Centre
de
VANVES

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

CENTRE NATIONAL D'ENSEIGNEMENT A DISTANCE

ACOUSTIQUE

MM 106

Rédacteur : Gilles LEOTHAUD

Référence : D 5223 T
337

INTRODUCTION

L'acoustique musicale est une discipline extrêmement ancienne et ses origines se confondent avec les débuts de la spéculation philosophique dans la plupart des grandes civilisations. Pour ce qui concerne l'Occident, c'est aux Pythagoriciens (VI^{ème} s. av. J.-C.) que nous devons les toutes premières recherches en ce domaine.

Sur le personnage de Pythagore, nous ne savons rien, pas même s'il a réellement existé, mais la tradition lui attribue une idée géniale, dont les principes sont toujours valable à l'heure actuelle : après avoir divisé une corde vibrante en 2, en 3 puis en 4 parties égales, il compara les longueurs obtenues à la longueur totale, les associa à des hauteurs, et obtint l'octave à 1/2, la quinte aux 2/3, et la quarte aux 3/4 de la longueur de sa corde ; il établissait par là-même une correspondance entre l'arithmétique et la musique en posant l'équivalence des intervalles musicaux et des rapports fractionnaires.

L'instrument utilisé, le monocorde, une simple corde tendue et maintenue par deux chevalets coulissant sur une règle graduée permettant les calculs de proportion, a été en usage pendant près de 2500 ans, de l'Antiquité à la fin du XVIII^{ème} siècle. C'est assez dire l'influence qu'a exercée ce mode de raisonnement sur la théorie musicale.

C'est à Isaac Newton (1642-1727) que nous devons la deuxième grande révolution acoustique : en démontrant le rôle de l'air et de son élasticité dans la propagation des sons, il donna une nouvelle impulsion à la recherche, et permit à l'acoustique musicale de passer de l'ère de l'arithmétique à celle de la physique.

Ce fut probablement une perte de prestige incontestable pour cette discipline, qui servit de fondement à la cosmogonie pythagoricienne, qui partagea au Moyen-Age avec l'arithmétique, la géométrie et l'astronomie l'insigne privilège de constituer le quadrivium, de n'être plus désormais qu'une simple branche de la mécanique, elle-même un sous-ensemble de la physique. Mais il s'agit en réalité d'un progrès considérable qui transforma l'acoustique en science moderne.

A partir de là, les progrès, découvertes et inventions ont été très nombreux, et ne seront mentionnées ici que quelques étapes primordiales à la fois pour l'acoustique et la musique.

Le mathématicien français Joseph Sauveur (1653-1716) mit en évidence par le calcul qu'un son est composé d'harmoniques[1]. Cette découverte fut d'une importance capitale, au XVIII^{ème} siècle pour les théoriciens de la musique, et tout spécialement pour Rameau, qui en tint compte dans son traité *La Génération harmonique*, publié en 1737.

Peu de temps après, l'Anglais Brook Taylor (1685-1731) découvrit la formule des cordes vibrantes qui permet, connaissant certains paramètres, de calculer leur fréquence[2]. Dans le même esprit, Daniel Bernoulli (1700-1782), dernier descendant d'une illustre famille de mathématiciens suisses, détermina les paramètres nécessaires au calcul de la fréquence d'un tuyau sonore[3].

---

1 J. Sauveur, *Principes d'acoustique et de musique*, Paris, 1700.
2 B. Taylor, *Methodus incrementorum directa et inversa*, Londres, 1715..
3 D. Bernoulli, *Hydrodynamica*, Bâle, 1738.

Il faut également mentionner Félix Savart (1791-1841), passionné par les problèmes de fabrication d'instruments de musique, qui se posait la question du bien-fondé de certaines pratiques traditionnelles, non pas seulement en physicien, mais en curieux, en pragmatique, ce qui l'amena entre autre à créer un violon de forme trapézoïdale, bien connu des luthiers[1].

A l'aube du XX^{ème} siècle, les travaux de Lord John Rayleigh (1842-1919), Prix Nobel de physique en 1904, constituent la première grande synthèse de l'acoustique musicale moderne[2]. A la même époque, le physicien Henri Bouasse (1866-1953) entreprit une étude systématique de tout ce qui est susceptible de rendre un son : il en résulte un ensemble de traités d'acoustique théorique, dépassés parfois sur certains points, mais qui demeurent absolument fondamentaux[3]. Aucun travail de cette envergure n'a été publié depuis celui-ci.

Au milieu du XIX^{ème} siècle, une grande figure, Hermann von Helmholtz (1821-1894), est à l'origine de ce que j'appellerai la troisième révolution acoustique : physicien, physiologiste et musicien, Helmholtz opéra un rapprochement entre ses différentes spécialités en analysant les sons non plus seulement comme des objets physiques, mais en fonction des effets qu'ils produisent[4].

Historiquement, il serait juste de dire qu'il rejoignait en cela les préoccupations d'Aristoxène de Tarente, un disciple d'Aristote, qui posait déjà au IV^{ème} siècle avant J.-C. des questions bien embarrassantes[5],

---

1 F. Savart, *Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet,* Paris, 1819.

2 J. Rayleigh, *Theory of Sound*, 2 vol., Londres, 1878.

3 Cf. notamment *Cordes et membranes*, Paris, 1926 ; *Verges et plaques, cloches et carillons*, Paris, 1927 ; *Tuyaux et résonateurs*, Paris, 1929 ; *Instruments à vent*, 2 vol., Paris, 1929-1930.

4 H. von Helmholtz, *Die Lehre von dem Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Braunschweig, 1863. Trad. fr.: *Théorie physiologique de la musique fondée sur l'étude des sensations auditives*, Paris, 1868.

5 Cf. *Sur le rythme*, et *Éléments harmoniques*.

notamment sur la nature des consonances et des dissonances, ou sur les pouvoirs d'entraînement de certains rythmes, questions que la science de son temps était loin de pouvoir résoudre. Helmholtz, en étudiant les sensations auditives, en tentant de les mesurer, fonda la psycho-physiologie de l'audition avec pour résultat immédiat la première théorie cohérente, quoique aujourd'hui périmée, du fonctionnement de l'oreille interne (théorie de la résonance, 1857 ; cf. chap. VIII).

Ces travaux ont été suivis de beaucoup d'autres, qui ont conduit à une connaissance de plus en plus approfondie de notre façon de percevoir les sons. La théorie de l'audition admise à l'heure actuelle est due à un chercheur américain d'origine hongroise, Georg von Bekesy (1899-1972), et valut à son auteur le Prix Nobel de médecine en 1961[1].

Au XX^{ème} siècle, l'acoustique a beaucoup progressé tout en élargissant considérablement le champ de ses investigations : acoustique théorique, acoustique architecturale, domaine des infrasons et des ultrasons, électro-acoustique, mesure des bruits et protection de l'environnement, psychoacoustique, sont quelques exemples parmi les nombreuses spécialités étudiées à l'heure actuelle.

Au sein de cet ensemble, l'acoustique musicale occupe une place sans doute modeste, mais s'avère indispensable à tous les musiciens (au sens le plus large du terme) qui s'intéressent à leur pratique et cherchent à en comprendre les fondements. Cette discipline, en effet, du moins telle qu'elle sera exposée ici, s'appuie essentiellement sur l'expérience concrète de la musique. L'acoustique musicale est théorique dans sa finalité, en ce qu'elle cherche à comprendre la nature des phénomènes, et au mieux à découvrir et formuler des lois, mais demeure profondément pragmatique quant à sa démarche. Ce point est important, car s'il est beaucoup plus facile d'expérimenter et de raisonner sur des artefacts en

---

1 G. von Bekesy, *Experiments in Hearing*, New York, 1960.

laboratoire que sur des sons musicaux bien réels, riches de toute leur complexité, les réactions obtenues et les connaissances que l'on peut en tirer ne sont malheureusement pas directement applicables au domaine musical, qui est celui qui nous intéresse. Ces quelques réflexions paraissent peut-être un peu abstraites, mais prendront toute leur signification lorsque nous aborderons l'étude de la psychoacoustique.

* *
*

L'objet de l'acoustique musicale est finalement vaste, ambitieux, et recouvre des territoires variés, impliquant le concours d'autres disciplines scientifiques. Il n'est dès lors pas possible d'en approcher tous les aspects, et je limiterai mon propos à trois grandes questions, qui correspondent dans ce cours à trois parties, elles-mêmes divisées en seize chapitres.

La **première partie** (chapitre I à VI) concerne l'étude du son musical : elle explique ce qu'est un son, comment il est construit, structuré, et comment il se comporte. Les deux premiers chapitres constituent pour l'essentiel un rappel de notions mathématiques et physiques de base, simplifié à l'extrême, qui s'adresse surtout aux étudiants issus des filières littéraires ; cet exposé n'exige pratiquement aucune connaissance scientifique préalable, et peut être réellement compris par tous.

La **deuxième partie** (chapitre VII à IX) est consacrée à l'étude du système auditif humain : sous l'angle anatomique, d'abord, pour en avoir une description et savoir comment est constituée notre oreille ; sous l'angle physiologique, ensuite, pour en comprendre le fonctionnement. Le chapitre VII étudie une importante fonction de notre oreille, la faculté de localiser les sons et de pouvoir déterminer leur provenance.

La **troisième partie** (chapitre X à XVIII) étudie le comportement et les performances du système auditif en fonction de l'intensité, de la hauteur et du timbre des sons : c'est le domaine de la psychoacoustique. Seront également abordées les principales questions liées à ces trois paramètres, à savoir la surdité et les déficiences auditives, les tempéraments musicaux, la constitution des échelles et les systèmes acoustiques, l'évolution du diapason, l'accord des instruments, ainsi que le problème du bruit.

Une **table analytique** se trouve à la fin du cours. Je vous conseille de vous y référer souvent, chaque chapitre et même chaque paragraphe devant toujours être situé par rapport à l'ensemble. Cette recommandation est importante pour bien saisir l'organisation et l'articulation de l'exposé, ainsi que l'interdépendance de ses différentes parties ; cette consultation sera d'ailleurs facilitée grâce à l'utilisation de la numérotation arborescente.

Le cours se suffit à lui-même pour l'essentiel et la **bibliographie** (placée à la fin du cours), est surtout donnée à titre indicatif, à l'intention des étudiants désireux d'approfondir tel ou tel point particulier. La plupart des ouvrages cités ne pourront être consultés qu'en bibliothèque.

Enfin, 6 devoirs vous sont proposés : ils ne sont pas très difficiles, mais faites-les soigneusement, car c'est le seul moyen véritablement efficace de vérifier la bonne assimilation de vos connaissances.

CHAPITRE I

NATURE ET STRUCTURE DU SON MUSICAL

1. Notion de mouvement

1.1. Le mouvement périodique

1.1.1. Définitions

Un mouvement est périodique lorsqu'il se reproduit identique à lui-même, indéfiniment, au bout d'un certain temps appelé **période.**

La notion de mouvement est très générale, et doit être comprise dans son sens le plus large : ainsi, les oscillations d'un diapason, une colonne d'air vibrant dans un tuyau, mais tout aussi bien une séquence complexe de gestes répétitifs, sont des mouvements périodiques.

Un **cycle** est un mouvement isolé qui se répète périodiquement ; par exemple, un aller-retour de ses deux branches constitue le cycle du diapason.

L'**amplitude**, notée a, est l'élongation maximum du cycle à partir de sa position de repos.

La **fréquence** N est le nombre de cycles par unités de temps (en acoustique, l'unité de temps est la seconde) ; le nombre de cycles par

secondes s'exprime en hertz[1] et s'abrège en Hz : les branches du diapason oscillent 440 fois en une seconde, la fréquence du mouvement est donc égale à 440 Hz.

La **période** T est la durée en seconde d'un cycle : la période du diapason vaut 1/440 de seconde. Conséquence importante, la période est l'inverse de la fréquence : pour un mouvement périodique de fréquence 1000 Hz, la période T est égale à 1/1000 de seconde.

Notons d'ores et déjà que l'amplitude correspond à l'intensité du son, et la fréquence à sa hauteur. Mais nous reviendrons sur ce point (chap. II), lorsque sera établie la correspondance physique entre mouvement et onde sonore.

1.1.2. Le mouvement périodique simple

Considérons un point A tournant sur la circonférence d'un cercle, animé d'une vitesse constante et uniforme : c'est un mouvement simple, le plus simple qui soit mathématiquement, que l'on appelle mouvement sinusoïdal (décrit ici dans sa 1ère représentation). Projetons à présent la perpendiculaire de ce point A sur le diamètre xy (fig. 1). Le point B ainsi obtenu est animé d'un mouvement équivalent, mais cependant différent, car sa vitesse n'est plus uniforme : elle est maximum au centre 0 du cercle, puis ralentit progressivement jusqu'à devenir nulle en x, repart en sens inverse pour être maximum en 0, ralentit en direction de y jusqu'à être nulle à l'extrémité de sa course, puis repart en sens inverse animé d'une nouvelle accélération, et ainsi de suite. Le mouvement de B est toujours sinusoïdal, mais dans une deuxième représentation. L'amplitude est égale au rayon r du cercle, un cycle est un aller et retour complet effectué le long du diamètre xy, la période est la durée en seconde

[1] Depuis 1930, en hommage au physicien allemand Heinrich Hertz (1857-1894), qui découvrit les ondes électromagnétiques.

d'un aller et retour complet, et la fréquence le nombre d'allers et retours complets en une seconde.

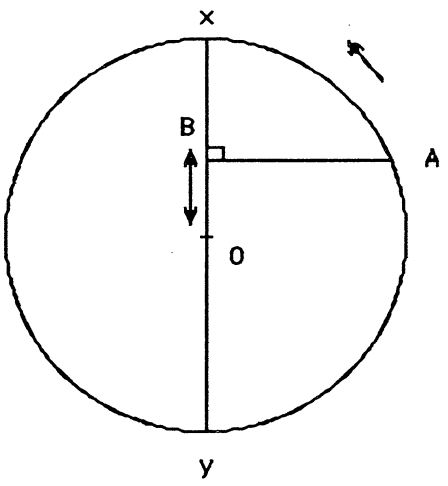


Fig. 1 : le mouvement sinusoïdal

Ce mouvement nous est familier, surtout si nous regardons non plus verticalement mais horizontalement le diamètre xy : le va-et-vient du point B est le mouvement du pendule.

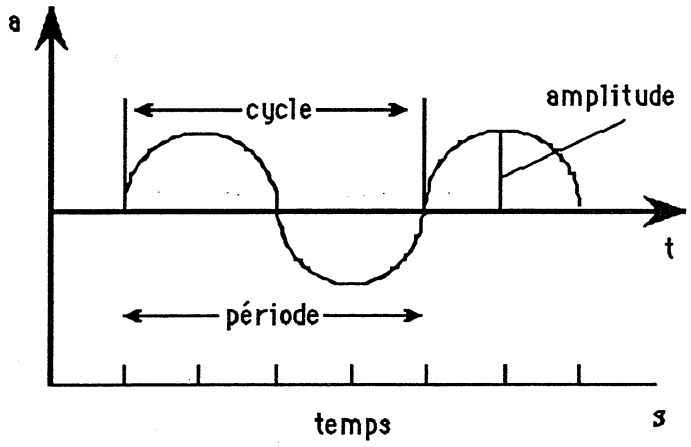


Fig. 2 : la sinusoïde

Il est possible de représenter par une courbe dans le temps les oscillations du point B (fig. 2), avec l'amplitude a en ordonnée et le temps t en abscisse : l'allure de cette courbe est bien connue, c'est la 3ème représentation du mouvement sinusoïdal. La période T est le temps qui sépare deux maxima d'élongation, ou tous autres points homologues.

1.1.3. Le mouvement périodique complexe ; la loi de Fourier

Dans la nature, les véritables mouvements simples n'existent pratiquement jamais isolément, et on rencontre d'autres mouvements, qui, tout en restant périodiques, ne ressemblent pas à celui que nous avons observé jusqu'à présent ; leurs formes peuvent varier à l'infini, comme les deux exemples de la figure 3 peuvent le suggérer (il s'agit toujours de courbes amplitude/temps, mais les axes ne sont pas représentés) :

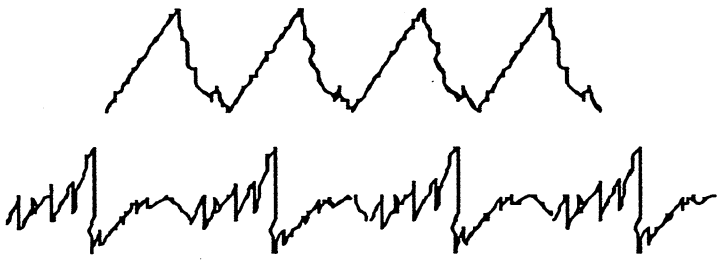


Fig. 3 : mouvements périodiques complexes

Puisqu'ils ne pas simples, nous les appellerons tout naturellement des mouvements complexes. De cette évidence découle une conséquence importante : il n'existe en tout et pour tout que deux sortes de mouvements périodiques, les mouvements simples (ou sinusoïdaux) et les mouvements complexes. Plus encore, nous allons constater à présent que tous les mouvements complexes, sans exception, ne sont formés, « fabriqués » pourrait-on dire, que de mouvements simples.

La loi de Fourier : le mathématicien Joseph Fourier (1768-1830), alors qu'il travaillait à un modèle mathématique de la propagation de la chaleur dans différents solides, a démontré (en 1812) que *tout mouvement périodique complexe peut toujours se décomposer en une somme de mouvements périodiques simples dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence la plus petite*. Les mouvements (ou composants) simples sont appelés **harmoniques**, et l'harmonique de plus petite fréquence, le **fondamental**. A noter au passage que les noms *harmonique* et *fondamental* sont du genre masculin.

Illustrons ce théorème par un exemple. Soit un mouvement périodique de 100 Hz : sans autre précision, nous ne pouvons en connaître la composition, et savoir s'il est simple ou complexe. Simple, c'est une sinusoïde de 100 cycles par seconde ; complexe, il se compose de plusieurs mouvements de fréquences différentes, par exemple :

1100
600
500
300
200
100

Toutes ces fréquences sont bien des multiples entiers de la plus petite d'entre elles, ici 100 Hz, le fondamental : ce sont les harmoniques du mouvement complexe de 100 Hz. Nous remarquons également dans cet exemple que tous les multiples entiers ne sont pas nécessairement présents ; il peut en manquer, comme ici 400, 700, 800, 900 ou 1000 Hz : la série des harmoniques est de ce fait incomplète, ce qui est très fréquemment le cas des mouvements complexes naturels.

Tout harmonique ayant pour fréquence n fois celle du fondamental, n représente son coefficient multiplicateur, mais également son numéro d'ordre dans la série. Dans l'exemple ci-dessus, 300 Hz est le 3ème

harmonique, et 1100 le 11ème, quoique ce dernier soit le 6ème composant, puisqu'il manque certains d'entre eux. En outre, le fondamental est toujours l'harmonique 1.

La loi de Fourier, avec ses conséquences sur la structure des sons, est d'une importance capitale en acoustique musicale, et nous y ferons souvent référence.

1.2. Le mouvement non périodique complexe

Ce type de mouvement est composé de cycles qui ne se répètent pas exactement identiques à eux-mêmes (fig. 4).

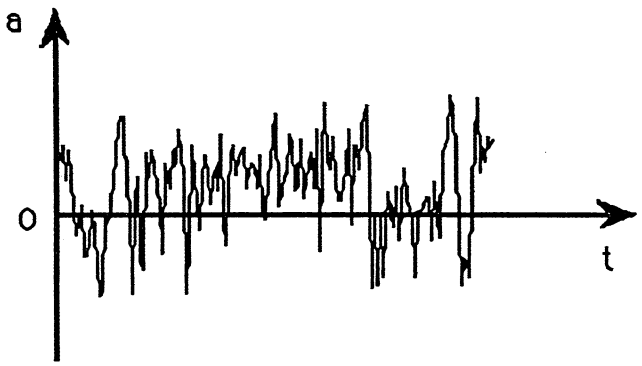


Fig. 4 : mouvement non périodique

Il existe bien sûr une infinité de possibilités ; d'ailleurs, dans la nature, un mouvement[1] ne se répète jamais de façon rigoureusement identique : soit les périodes n'ont pas toutes la même durée, ce qui entraîne une variation de sa fréquence, soit l'amplitude varie à chaque cycle, les deux causes pouvant en outre se produire simultanément.

---

[1] Nous verrons au chapitre II que les mouvements dont il est question depuis le début sont en réalité des sons.

Dans un tel cas le mouvement est complexe, mais ne se laisse pas décomposer en séries de Fourier : bien que les composants soient toujours sinusoïdaux (et il ne saurait en être autrement puisque les mouvements simples sont les seuls éléments de construction des mouvements complexes), leur fréquence n'est cette fois plus un multiple entier de celle du fondamental ; ils pourraient valoir, par exemple, pour un fondamental de 100 Hz :

1142
963
807
759
538
480
277
100

Pour distinguer ces composants des harmoniques, on les appelle des **partiels** ; le mouvement non périodique n'est donc pas harmonique, il est un **mouvement à partiels.** Sur le plan musical, le mouvement non périodique complexe correspond à des sons non entretenus (cf. chap. II), par exemple ceux des instruments à cordes pincées, frappées, ou encore des instruments à percussion ; les spectres harmoniques, au contraire, sont délivrés par les instruments à sons entretenus, comme les cordes frottées ou les vents.

2. Représentation graphique du mouvement complexe

2.1. La phase

Considérons à nouveau la 1ère représentation du mouvement sinusoïdal, un point A qui tourne autour d'un cercle de centre 0 à vitesse

constante et uniforme. Observons maintenant un point B tournant sur le même cercle, à la même vitesse que A, mais parti après lui (fig. 5) :

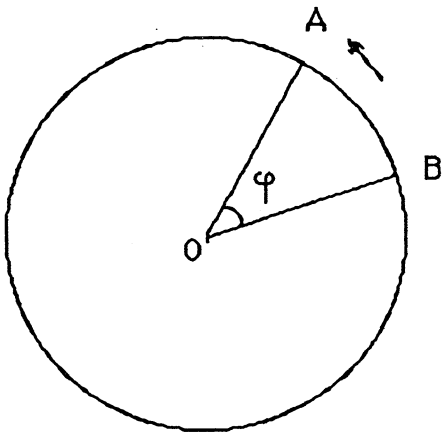


Fig. 5 : l'angle de phase

On appelle **angle de phase** φ (lettre grecque phi) l'angle $\widehat{AOB}$ formé par les rayons de ces deux points au centre. L'angle φ reste constant dans ce cas de figure, puisque les deux points tournent à la même vitesse. La phase est donc la constante angulaire d'un mouvement périodique.

Quatre cas peuvent se présenter :

•A et B sont confondus : φ = 0° et les deux mouvements (et donc les deux courbes correspondantes) sont dits **en phase** ;

•A et B sont diamétralement opposés : φ = 180°, et les deux mouvements sont dits **en opposition de phase** ; le retard d'une courbe sur l'autre est d'une demi-période (ou égal à π) ;

•A et B sont décalés d'un angle droit, soit un quart de période (ou π/2) : les deux mouvements sont en **quadrature de phase** ;

•dans tous les autres cas, lorsque A et B sont en position quelconque sur la circonférence du cercle, nous dirons que les deux mouvements sont simplement en **décalage de phase.**

Remarque : si B possède un tour complet de retard sur A, les deux points sont de nouveau confondus, mais le décalage de phase est d'une période complète, et $\varphi = 360°$ (ou 2π).

2.2. Somme algébrique de mouvements simples

Les mouvements sinusoïdaux, quelles que soient leur fréquence, leur amplitude et leur phase respectives, s'additionnent algébriquement (cf. les termes du théorème de Fourier) lorsqu'ils rentrent en combinaison. Cela signifie que l'amplitude des courbes s'additionne point par point en tenant compte de ses valeurs éventuellement positives et négatives. La figure 6 montre trois courbes sinusoïdales a, b et c, respectivement de fréquence N, 2N et 3N, et d'amplitude a, a/2 et a/3. En tous points, la somme algébrique de ces trois courbes donne des valeurs résultantes dont l'ensemble constitue la courbe A. Que remarquons-nous ?

a) Une somme de mouvements simples donne bien un mouvement complexe : il est clair en effet que A n'est pas sinusoïdal.

b) A est-il périodique ? Oui, bien sûr, car si la cause qui l'a produit (superposition de a b c) se répète, A se répétera identique à lui-même.

c) Quelle est la fréquence de A ? Elle est égale à celle de a, c'est-à-dire à celle du composant de plus petite fréquence.

d) Il est clair que cet exemple entre dans le cadre de la loi de Fourier : A est un mouvement périodique complexe, a, b, et c sont ses harmoniques de rangs 1, 2 et 3, a étant le fondamental de ce spectre harmonique.

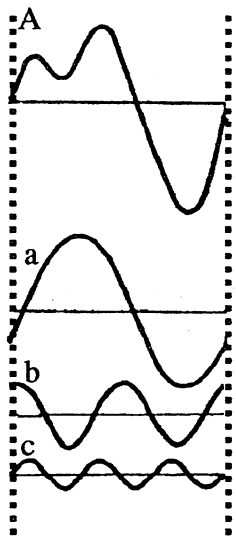


Fig. 6 : somme de trois sinusoïdes

2.3. Différents cas d'addition

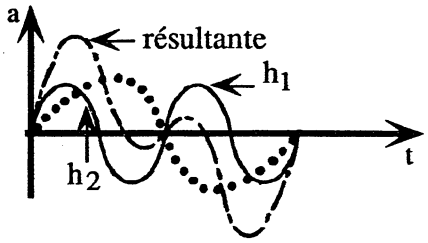


Fig. 7 : somme de deux sinusoïdes

Les combinaisons sont sans limites, comme pour les mouvements inharmoniques, si l'on tient compte de la phase et de l'amplitude des composants. La figure 7 présente deux harmoniques seulement (h_1 et h_2), en phase et de fréquences N et 2 N (comme dans l'exemple précédent), mais cette fois d'amplitudes égales. On peut comparer cette résultante avec celle du schéma précédent.

Examinons maintenant la figure 8 : elle montre deux mouvements sinusoïdaux en opposition de phase : ils sont en effet décalés d'une demi-période, soit 180° : dans une telle configuration, la résultante est nulle et

se confond avec l'axe des abscisses, puisqu'en tous points les valeurs positives de l'amplitude sont annulées par des valeurs identiques mais négatives. Les interférences sont ici destructives.

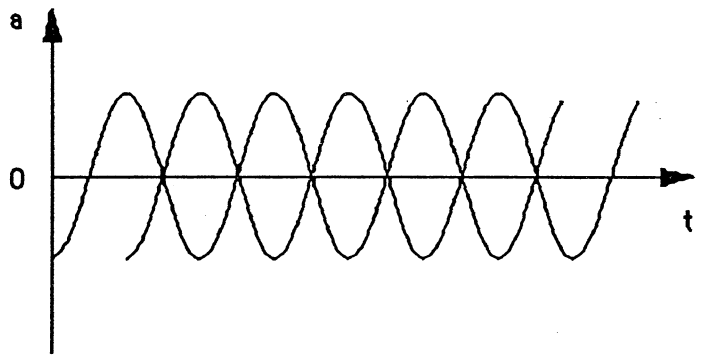


Fig. 8 : opposition de phase

2.3.1. Sons types

Il ne saurait être question de répertorier les différentes combinaisons de mouvements simples, qui sont responsables, nous le verrons, de l'immense variété des timbres des sons. Cependant, quelques cas typiques présentent un grand intérêt pour l'acoustique musicale.

La figure 9 montre (en trait plein) la résultante obtenue par l'addition de l'infinité des harmoniques de tous rangs, l'amplitude de chaque composant étant inversement proportionnelle à son rang harmonique soit la combinaison N, 2N, 3N, 4N, ..., nN, pour les fréquences, et a, a/2, a/3), a/4, ..., a/n, pour les amplitudes, tous les composants étant en phase. En raison de sa forme, on appelle cette résultante courbe en **dents de scie.**

Dans la réalité, évidemment, un son ne comprend jamais une infinité d'harmoniques, mais deux ou trois à quelques dizaines au maximum selon les cas ; toutefois, nous pouvons observer qu'avec un petit nombre d'harmoniques seulement, une résultante prend rapidement son

allure caractéristique. Sur la figure 9, la courbe en tirets, déjà proche d'une dent de scie théorique, est obtenue avec seulement les quatre premiers composants de la série de Fourier.

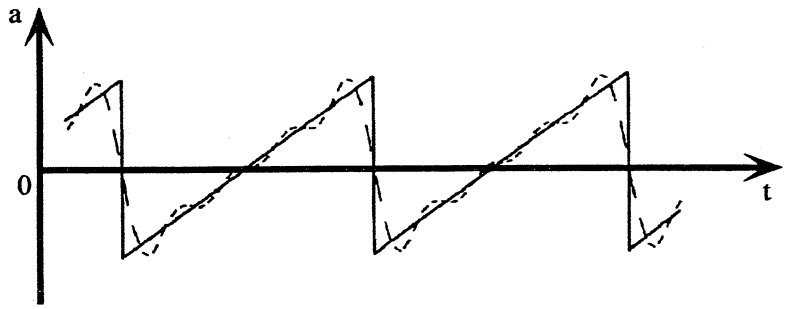


Fig. 9 : courbe en dents de scie

Si maintenant nous additionnons seulement les harmoniques de rangs impairs, à savoir les composants de fréquence N, 3N, 5N, 7N,..., avec, comme précédemment, une amplitude inversement proportionnelle au rang, soit a, a/3, a/5, a/7..., nous obtenons un **signal carré** (fig. 10).

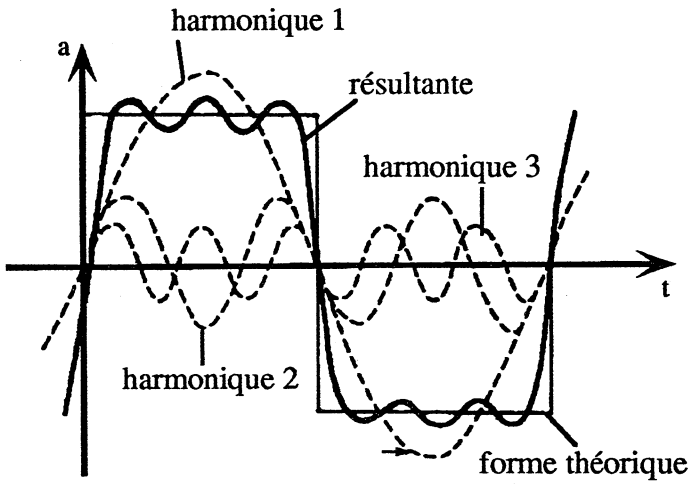


Fig. 10 : signal carré

On distingue en pointillé les trois premiers composants, c'est-à-dire les harmoniques h_1, h_2 et h_3 en phase, dont les amplitudes sont bien inversement proportionnelles ou rang, en trait gras la résultante réellement obtenue par cette addition, et en trait fin l'allure théorique du signal carré, forme que l'on obtiendrait en additionnant l'infinité des harmoniques de rangs impairs.

2.3.2. Battements

Le phénomène connu sous le nom de battements est d'une grande importance pratique, et il faut en bien comprendre le principe.

Soient deux sinusoïdes de fréquences très proches l'une de l'autre, et débutant en phase (fig. 11)

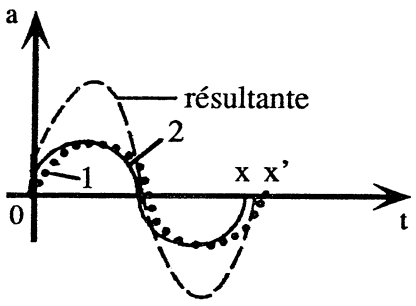


Fig. 11 : battements

A la fin de la première période, elles présentent un décalage XX', la courbe 2 étant plus rapide, c'est-à-dire ayant une fréquence supérieure (donc une période plus courte) à celle de la courbe 1. A la fin de la deuxième période, le décalage vaudra naturellement 2XX', à la troisième période 3XX', etc. Les deux courbes étant en phase au début du mouvement, la résultante présente une amplitude maximum ; le décalage, augmentant progressivement à chaque période, accentue le déphasage des deux mouvements après un certain nombre de périodes — qui dépend de la différence des deux fréquences — les courbes 1 et 2 seront

en opposition de phase, et la résultante sera nulle. Mais le décalage continue d'augmenter et dépasse 180° ; par conséquent, l'amplitude de la résultante augmente à nouveau, et atteindra sa valeur maximum quand les courbes 1 et 2 seront en phase, avec un décalage de 360°.

En résumé, lorsque deux fréquences voisines entrent en combinaison, la résultante passe périodiquement par des maxima et des minima d'amplitude, ce qui se traduit pour l'oreille par des renforcements et des atténuations du son, d'où le nom de battements.

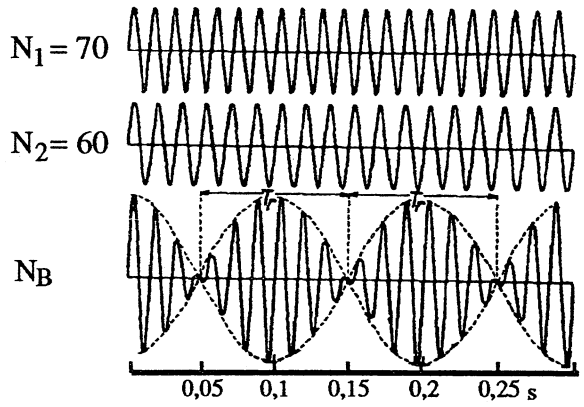


Fig. 12 : enveloppe des battements

La figure 12 montre deux sinusoïdes N_1 et N_2 de fréquence 70 et 60 Hz, avec au-dessous leur résultante N_B : en suivant bien le tracé en trait plein de celle-ci, on voit clairement l'amplitude passer successivement par des minima et des maxima, et pour rendre cette variation encore plus visible, un trait en pointillé précise l'enveloppe des battements en en épousant le contour.

Cette courbe résultante est-elle périodique ? Oui, puisque N_1 et N_2 le sont, et la fréquence N_B des variations d'amplitude, c'est-à-dire des battements, est égale à la différence des deux fréquences génératrices :

$$N_B = N_1 - N_2 = 10 \text{ bat./s} \qquad (1)$$

Quant à la fréquence N_{moy} du mouvement résultant, elle est égale à la moyenne de N_1 et N_2, soit :

$$N_{moy} = \frac{N_1 + N_2}{2} \qquad (2)$$

Il est possible d'utiliser une analogie pour expliquer le phénomène des battements, Considérons deux coureurs A et B qui tournent pendant une heure sur une piste circulaire. Le coureur A, plus rapide que le coureur B, couvre 50 tours, contre seulement 40 pour son adversaire. Ils terminent néanmoins la course ensemble, mais avec 10 tours de plus pour A, En résumé, 10 fois en une heure, A a dépassé B, lui a été diamétralement opposé, et l'a rejoint. Si nous additionnons ces deux courses (qui sont sinusoïdales si leur vitesse a été constante), les mouvements seront 10 fois en phase et 10 fois en opposition de phase, provoquant 10 maxima d'amplitude suivis de 10 minima, donc 10 « battements » dans l'unité de temps considérée.

Les battements ne se produisent pas uniquement entre des mouvements simples, mais aussi entre les composants de deux mouvements complexes. Soient par exemple deux spectres harmoniques N_1 et N_2 ,respectivement de fréquences 200 et 202 Hz. Un battement apparaît entre les fondamentaux, mais également entre leurs harmoniques :

800	808	8 battements/s
600	606	6 "
400	404	4 "
200	202	2 "

Si maintenant N_2 est à la quinte légèrement supérieure de N_1, les fréquences seront dans un rapport proche de 3/2 (cf. infra) :

800		
600	604	4 battements/s
400		
	302	
200		

Comme nous l'avons dit plus haut, les battements ont une grande importance en musique : il est possible d'entendre, grâce à eux, de très

petites différences de hauteur entre deux sons simultanés : par exemple entre 1000 Hz et 1001 Hz, l'oreille percevra aisément 1 battement par seconde, alors que mélodiquement, ces deux sons ne peuvent être différenciés. Ce phénomène est utilisé pour l'accord de certains instruments, et l'on peut atteindre ainsi une parfaite précision. Les battements sont également utilisés à des fins esthétiques : dans certains jeux d'orgues, par exemple, les tuyaux sont volontairement désaccordés afin de produire un battement lent (unda maris, voix céleste).

3. La série harmonique

La notion de série harmonique est sans aucun doute l'application de la loi de Fourier la plus utile aux musiciens (connaissance des intervalles et des fondements de l'harmonie) et son étude est importante en acoustique musicale.

3.1. Rapports harmoniques et intervalles musicaux

Quelle que soit la fréquence d'un fondamental, ses harmoniques entretiennent avec lui des rapports numériques constants ; l'harmonique 2 a toujours une fréquence double, et l'harmonique 13 une fréquence 13 fois supérieure. Il en est évidemment de même pour les harmoniques entre eux : le 5ème est toujours dans le rapport 5/4 avec le 4ème , et le 7ème dans le rapport 7/3 avec le 3ème.

Ces rapports numériques sont des rapports de fréquence aussi bien que des rapports de numéros d'ordre. La fréquence étant perçue par l'oreille comme la hauteur d'un son, un rapport de fréquence est perçu comme un intervalle musical.

En conséquence, les harmoniques d'un son seront ordonnés en une succession invariable d'intervalles, et ceci, encore une fois, quelle que soit

la fréquence du fondamental, c'est-à-dire la hauteur de la note. C'est précisément cette succession invariable d'intervalles que l'on appelle **série harmonique.**

3.2. Propriétés de la série harmonique

Voici, à partir d'un fondamental ut grave (do_1), la série des 16 premiers harmoniques (fig. 13). Rappelons que do_1 signifie « do indice 1 ». Toutes les octaves sont numérotées pour faciliter le repérage des notes ; les indices changent à partir de do ; par exemple, l'octave 4 est celle qui débute au do du 3ème interligne en clé de sol et se termine au si placé au-dessus de la 1ère ligne supplémentaire ; ainsi, le la du diapason est le la_3 (2ème interligne en clé de sol).

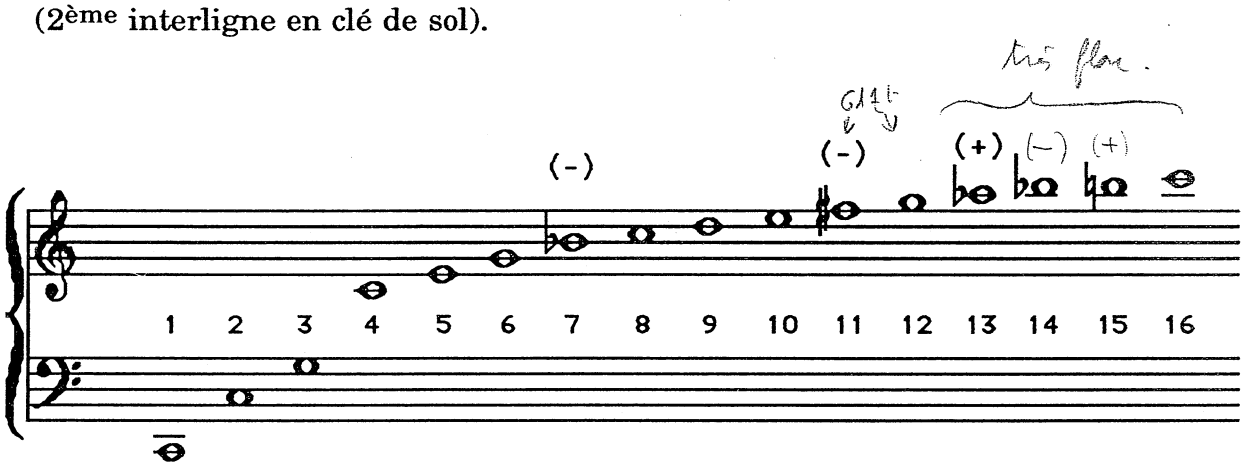


Fig. 13 : la série harmonique

La structure mathématique de la série harmonique lui confère des propriétés particulières qu'il est important de connaître pour en comprendre l'organisation.

1) La série harmonique est théoriquement illimitée ; toutefois les composants de fréquence très élevée n'ont pas assez d'énergie pour exister réellement, et en réalité un son possède quelques dizaines d'harmoniques tout au plus.

2) N'importe quelle hauteur, n'importe quelle note peut servir de fondamental : la série harmonique est une série d'intervalles.

3) Le numéro d'ordre d'un harmonique est son coefficient multiplicateur pour la fréquence : l'harmonique 6, par exemple, vaut 6 fois la fréquence du fondamental. Il est donc possible d'exprimer un intervalle par un rapport fractionnaire :

ex. : 5^{te} J → 3/2

3^{ce} M → 5/4

$7^{ème}$ m → 7/4

Chaque terme de la fraction désigne un harmonique par son numéro. Ce rapport est la valeur par laquelle il faut multiplier une fréquence pour obtenir celle de la note supérieure de l'intervalle :

Application : le diapason (la_3) est légalement fixé à 440 Hz. Quelle est la fréquence du mi_4 ?

Le mi_4 se trouve à la 5^{te} supérieure du la_3 ; sa fréquence est donc égale à :

$$440 \times \frac{3}{2} = 660 \text{ Hz.}$$

Pour trouver un intervalle descendant, il faut diviser la fréquence par le rapport fractionnaire, ce qui revient à multiplier par la fraction renversée :

$$mi_3 = \frac{440}{4/3} = 440 \times \frac{3}{4} = 330 \text{ Hz}$$

De même, en multipliant (ou en divisant) un coefficient par 2 (ou 2^n), on hausse (ou on baisse) le son correspondant de 1 (ou n) octave(s).

Les calculs exprimés ainsi concernent uniquement les rapports de fréquence ; si l'on raisonne à partir de cordes vibrantes ou de tuyaux, il faut inverser le sens des opérations, la longueur d'une corde ou d'un tuyau étant inversement proportionnelle à sa fréquence : ainsi les 3/4

d'une corde à vide donnent la 4te supérieure , et il faut diviser sa longueur par 4/5 pour obtenir la 3ce majeure inférieure d'un tuyau.

4) Les intervalles de la série harmonique sont sans battements, et qualifiés pour cette raison de « purs », « parfaits », « naturels », et parfois même de « justes ». Cette dernière dénomination paraît toutefois ambiguë — pour ne pas dire abusive — et devrait être évitée : il vaut mieux conserver ce terme pour juger un accord par rapport à un système culturel de référence. Ainsi peut-on déclarer « justes » les tierces majeures d'un piano accordé selon le tempérament égal, alors qu'elles comportent des battements parce que légèrement supérieures au rapport 5/4 de la série harmonique (cf. chap. XV). En acoustique, on utilise souvent le terme « strict » pour désigner les rapports sans battements de la série harmonique.

5) Les coefficients impairs correspondent à des sons nouveaux dans la série, les coefficients pairs à un son déjà présent à l'octave inférieure. Cela se vérifie dès le fondamental, qui est évidemment considéré comme nouveau. D'après cette loi, le 2ème harmonique ne peut être que l'octave du premier.

6) Les intervalles de la série harmonique sont de plus en plus petits. Cela est évident pour les premiers, mais mérite peut-être une explication pour les suivants : les harmoniques 7 et 8, 8 et 9, 9 et 10, par exemple, semblent former entre eux le même intervalle de 2de majeure. Ce n'est bien entendu qu'une apparence, due seulement à la notation utilisée. D'ailleurs, sur le plan arithmétique, il est clair que :

$$\frac{8}{7} > \frac{9}{8} > \frac{10}{9}$$

La hauteur des harmoniques, déterminée par la nature elle-même (la physique des mouvements vibratoires) ne correspond pas toujours

exactement à celle de nos notes de musique, réglée par les opérations culturelles du tempérament (cf. chap. XV). Certains composants, comme le 11ème ou le 13ème, par exemple, sont très éloignés des notes qui servent à les transcrire (d'où l'utilisation des (+) et (–) placés au-dessus). Il faut donc éviter d'utiliser ces rapports « faux » pour calculer les intervalles de nos gammes usuelles.

7) Les octaves successives de la série harmonique contiennent de plus en plus de sons différents :

1ère octave : 1 son
2ème octave : 2 sons
3ème octave : 4 sons
4ème octave : 8 sons
etc.

Chaque octave peut donc être exprimée par une puissance de 2 :

1ère octave : 2^0
2ème octave : 2^1
3ème octave : 2^2
4ème octave : 2^3
etc.

Ces différentes propriétés permettent de retrouver la série ou de la poursuivre assez loin sans avoir à l'apprendre par cœur. Il est néanmoins indispensable d'en connaître au moins les seize premiers composants.

3.3. Application à la composition spectrale

Les propriétés de la série permettent de tirer des enseignements fondamentaux sur l'organisation des spectres harmoniques :

a) la différence entre deux harmoniques de rangs voisins est toujours égale à la fréquence du fondamental. Par conséquent, la présence de celui-ci n'est pas indispensable pour déterminer la fréquence du spectre. Ex.:

700
600
500
400

Ce mouvement périodique complexe comprend quatre harmoniques, et il est clair que 400 Hz ne saurait en être le fondamental, les autres fréquences n'étant pas des multiples entiers de 400. En revanche, les composants sont bien des multiples entiers de 100 Hz qui est le fondamental réel, absent ici, dont ils sont les harmoniques 4, 5, 6 et 7. La fréquence d'un tel spectre est bien de 100 Hz, parce que la différence entre deux harmoniques de rangs consécutifs est de 100 Hz (cf. chap. XIII).

b) Considérons à présent le spectre suivant :

800
700
600
500
400
300
200
100

Sa fréquence est de 100 Hz, il comprend huit harmoniques, et sa forme est en dents de scie (cf. p. 20). Si nous supprimons ses harmoniques de rangs impairs, il reste :

800
600
400
200

Tous les composants sont maintenant des multiples entiers consécutifs de 200 Hz, qui est donc la fréquence du nouveau fondamental. Par cette opération, nous avons octavié vers l'aigu.

Supprimons maintenant du spectre original les harmoniques de rangs pairs :

700
500
300
100

Ce résultat est très différent du précédent : les composants demeurent bien des multiples entiers du fondamental, mais ne sont plus de rangs consécutifs ; la fréquence reste toujours de 100 Hz, le spectre ne présente qu'un harmonique sur deux : les dents de scie se sont transformées en signaux carrés.

Supprimer les harmoniques de rangs impairs change la hauteur, supprimer les harmoniques de rangs pairs modifie le timbre.

CHAPITRE II

LES SYSTÈMES OSCILLANTS

1. Les unités fondamentales

Avant d'entreprendre l'étude du son en tant que phénomène vibratoire, il est peut-être utile de rappeler le sens de quelques unités fondamentales.

1.1. Vitesse et accélération

A partir des quantités fondamentales que sont le temps t, mesuré en secondes (symbolisées s), et la longueur L en mètres (m), et qu'il n'est pas utile de définir ici, nous pouvons exprimer d'autres grandeurs.

La **vitesse v** mesure en m/s (ou $m \cdot s^{-1}$, ce qui revient au même) la valeur du déplacement d'un corps, en fonction de la distance L et du temps t, soit :

$$v = \frac{L}{t} \qquad (3)$$

dont on tire évidemment L = vt et t = L/v.

Le mouvement peut changer soit de direction, soit de valeur, c'est-à-dire de vitesse, ou des deux à la fois. Cette variation est appelée l'**accélération** du mouvement, et symbolisée par la lettre grecque γ

(*gamma*). Par exemple, le point B le long du diamètre xy (cf. fig. 1) est en constante accélération ; celle-ci peut être positive ou négative (c'est alors une décélération).

Soit un mobile passant d'une vitesse de 4 m/s à 10 m/s en 3 s. Nous écrirons :

$$\frac{10\ \text{m/s} - 4\ \text{m/s}}{3\ \text{s}} = \frac{6\ \text{m/s}}{3\ \text{s}} = \frac{2\ \text{m/s}}{1\ \text{s}} = \frac{2\ \text{m}}{1\ \text{s}^2}$$

et par conséquent : $\gamma = 2\ \text{m/s}^2$

L'accélération se mesure donc en m/s^2 :

$$\boxed{\gamma = \frac{L}{T^2}} \qquad (4)$$

1.2. Masse

La **masse** est la quantité de matière d'un corps. Tout corps possède une masse m, qui reste constante quel que soit l'endroit où il se trouve (sur terre ou en apesanteur). La masse se mesure en kilogrammes (kg).

1.3. Force

La **force** est nécessaire à la réalisation d'une action qui peut se réduire à deux principes : la déformation d'un corps (allongement ou compression d'un ressort, tension d'une membrane), ou sa mise en mouvement (changement de direction, de vitesse), c'est-à-dire une accélération. Pour des raisons pratiques, la force F est mesurée en fonction de l'accélération γ qu'elle est capable de communiquer à une masse m. La loi de la relation fondamentale de la dynamique[1] établit que :

$$\boxed{F = m \cdot \gamma} \qquad (5)$$

---

[1] Deuxième des trois lois formulées par Isaac Newton.

c'est-à-dire que la force est égale au produit de la masse par l'accélération. Accroître la force augmente l'accélération, alors que l'accroissement de la masse provoque un effet contraire.

L'unité de force est fourni par l'équation 5 : si m = 1 kg et $\gamma = 1$ m/s^2, alors F = 1 kg/m par s^2, unité qui a reçu le nom de newton (N). Un newton est la force qu'il faut pour communiquer à une masse de 1 kg une accélération de 1 m/s^2.

La gravitation est une force qui s'exerce sur tous les objets, et dont la direction est le centre géométrique de la terre. L'action de cette force de gravitation, la pesanteur, est appelée poids. Si un objet est immobile, par exemple un vase sur une table, c'est qu'il est soumis à deux forces opposées, égales mais de sens contraire[1] : à la pesanteur s'oppose la force de la table. La masse est en équilibre et les deux forces s'annulent. De même, lorsqu'une accélération est communiquée à un corps par une force qui cesse aussitôt son action, le corps se meut en ligne droite jusqu'à ce qu'une autre force agisse en sens inverse pour le stopper[2] (les frottements de l'air ou du sol, entre autres).

Lorsqu'un objet de masse quelconque est lâché au-dessus du sol, son poids lui communique une accélération d'environ 9,8 m/s^2. D'après l'équation (5), le poids F en newtons de cet objet est proportionnel à sa masse en kilogrammes, et vaut 9,8 fois cette masse.

1.4. Pression

La force n'agit pas toujours sur un point, mais peut s'appliquer à une surface ; dans ce cas, elle est prise en compte par unité de surface, c'est-à-dire en newtons par m^2 et se nomme **pression**. Cette unité se nomme le pascal (Pa), 1 Pa étant la pression exercée par une force de 1 N

---

1 « Loi de l'action et de la réaction », troisième loi de Newton.
2 Première loi de Newton, dite « loi d'inertie ».

sur une surface plane de 1 m^2. La valeur de la pression p sur une surface S est donnée par :

$$p = \frac{F}{S} \qquad (6)$$

L'air environnant exerce sur nous une pression, dite atmosphérique, d'environ 10^5 Pa (ou 1000 hectopascals, comme disent les météorologues). Une variation de cette pression (accroissement brusque quand deux trains se croisent, ou décroissance progressive lorsque l'on prend de l'altitude) est responsable de la désagréable sensation d'oreilles bouchées (cf.chap.VIII).

1.5. Travail et énergie

Le **travail**, symbolisé W, d'une force F est le déplacement de son point d'application sur une distance L. Il est égal à :

$$W = F \cdot L \qquad (7)$$

Il ressort de cette formule que le travail se mesure en newtons/m, ou joules. Un joule (J) est le travail d'une force de 1 N déplaçant son point d'application de 1 m. Soulever un objet de 1 kg à 2 mètres au-dessus du sol demande une force de 9,8 N et suppose donc un travail de 19,6 J.

Si une force s'exerce sans produire de mouvement, à cause d'une autre force égale agissant en sens inverse, elle ne produit pas de travail. Tout travail dépense de l'**énergie**, qui doit être fournie quand un système accomplit une tâche quelconque. L'une des lois fondamentales de la physique, le principe de conservation de l'énergie, pose que celle-ci ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement changée d'une forme en une autre. De ces différentes formes, c'est surtout l'énergie mécanique qui intéresse l'acoustique musicale. Elle apparaît sous deux aspects : l'énergie potentielle et l'énergie cinétique. Un système possède la première de par sa configuration, et la seconde par son mouvement.

Élever un objet de 1 kg à 2 m au-dessus du sol, comme précédemment, lui permettrait d'exercer une force de 9,8 N et d'accomplir une

quantité de travail égale à 19,8 J : son élévation a communiqué à cet objet une énergie potentielle. Si nous imprimons maintenant à cette masse une accélération, avec une force de 9,8 N sur une distance de 2 m, son mouvement lui permettrait d'accomplir un travail de 19,8 J : cette masse possède une énergie cinétique.

Les deux formes d'énergie sont interchangeables. Lever un objet lui confère une énergie potentielle ; le lâcher transforme cette énergie potentielle en une quantité égale d'énergie cinétique. Dans notre exemple, l'énergie totale, potentielle plus cinétique, demeure égale à 19,8 J.

1.6. Puissance

Un dernier paramètre doit encore être introduit pour qualifier le travail : c'est le temps nécessaire à sa réalisation. Un travail effectué en 5 s ou 10 s reste identique et vaut, par exemple, 20 J, mais ne suppose pas la même **puissance**. La puissance W d'un système est égale au travail T effectué dans le temps t, soit :

$$W = \frac{T}{t} \qquad (8)$$

J

s

Watt $\left(\begin{matrix} n/m/s \\ J/s \end{matrix}\right)$

La puissance se mesure en joules/secondes, ou watts (symbolisés w). Une dépense d'énergie de 1 joule pendant 1 seconde correspond à une puissance de 1 watt.

2. Notion d'oscillation

2.1. Définition

D'une façon générale, une onde est produite par l'ébranlement élastique des molécules du milieu dans lequel elle se propage. Un milieu est dit élastique s'il oppose sa force de cohésion aux forces qui tendent le

déformer, et s'il reprend sa forme initiale après une perturbation, comme s'il ne s'était rien passé.

L'air est un milieu élastique, et sa force de cohésion peut être mise en évidence par la résistance qu'il oppose à sa compression, par exemple dans une pompe à bicyclette. Les molécules d'air sont en équilibre, à la pression atmosphérique, et tout ébranlement provoque des mouvements oscillatoires de celles-ci autour de leur point d'équilibre. Le son est une variation de la pression aérienne.

Ces ébranlements peuvent être décrits, analysés mathématiquement et représentés graphiquement comme tous les mouvements que nous avons rencontrés au chapitre précédent, et les oscillations des molécules sont assimilables au mouvement sinusoïdal dans sa deuxième représentation (cf. p. 10). Tout ce que nous savons des mouvements simples et complexes peut désormais se traduire en termes de son.

2.2. L'oscillateur harmonique

Avant d'entreprendre l'étude des oscillations susceptibles de produire des sons, il est utile d'expliquer leur principe fondamental.

Considérons un ressort, fixé par son extrémité supérieure à un point rigide, et accrochons une masse m à son extrémité libre (fig. 14). La longueur de l'ensemble poids et ressort au repos correspond à L. Tirons la masse m vers le bas, en exerçant une force F_1 pour réaliser un allongement ΔL, et maintenons-la dans cette position : la masse est immobile, un équilibre est réalisé puisque la force F_1 est compensée par la force F_2 de rappel élastique du ressort : le système est chargé en énergie potentielle. Si nous relâchons la masse, F_1 disparaît immédiatement et F_2 n'est plus contrebalancée. Puisque l'étirement du ressort est proportionnel à la force F_1, la force de rappel F_2 est proportionnelle au déplacement de la masse m par rapport à sa position d'équilibre ; la

masse subit une accélération, est rappelée vers le haut, passe par sa position d'équilibre, où F_2 est nulle, puis la dépasse de par son inertie : à ce moment, la force F_2 réapparaît mais en direction contraire ; la vitesse de la masse diminue jusqu'à être nulle arrivée au bout de sa course, en un point où F_2 est maximum ; la masse repart en sens inverse, et ainsi de suite.

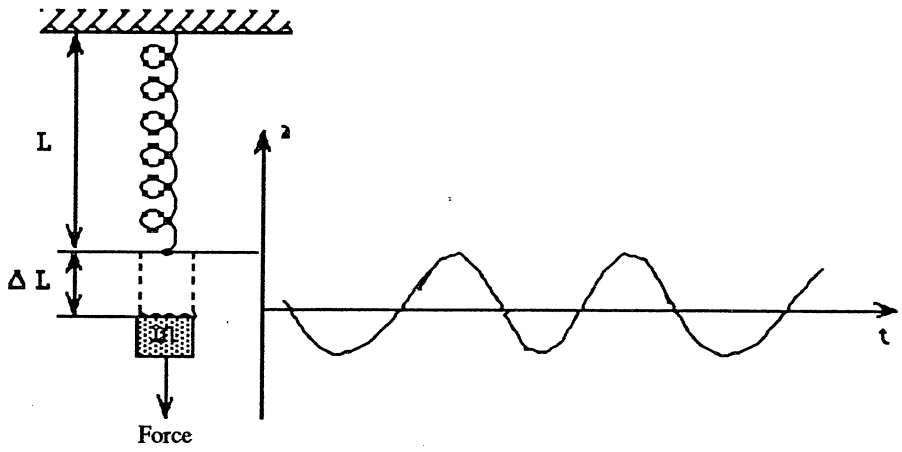


Fig. 14 : l'oscillateur harmonique

Nous pouvons représenter par un graphique le rapport existant entre la vitesse de la masse et son parcours c'est-à-dire l'élongation du ressort (fig. 15) :

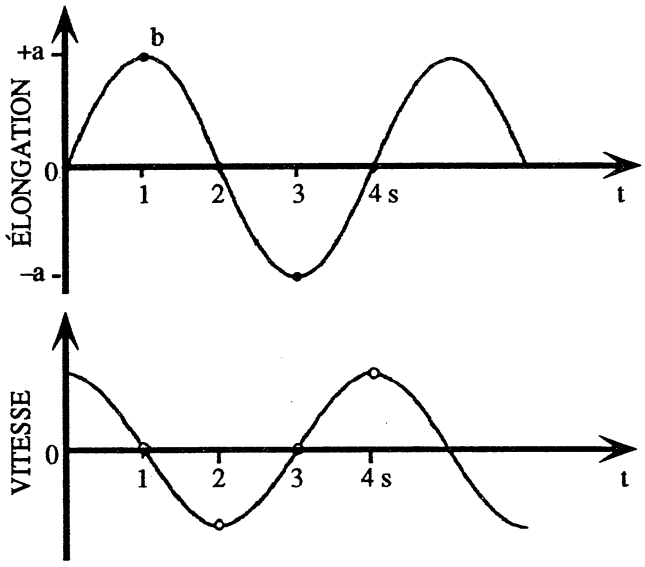


Fig. 15 : élongation et vitesse

La période du mouvement valant 4 secondes, le point d'amplitude maximum est atteint au bout de 1/4 de cycle, soit 1 s. A ce moment, la vitesse est nulle, comme l'indique la deuxième courbe ; quand la masse m repasse par sa position d'équilibre en coupant l'axe des abscisses au bout de 2 s (une demi-période), la vitesse est maximum, mais négative si nous supposons positif le sens de l'étirement. Les deux courbes sont identiques, mais décalées l'une par rapport à l'autre de 1/4 de période, c'est-à-dire en quadrature de phase.

Comme le montrent les courbes de la figure 15, le mouvement de la masse m serait parfaitement sinusoïdal — et donc perpétuel — si des forces de frottements n'existaient pas. C'est pourquoi un tel dispositif est appelé oscillateur harmonique : oscillant sur place autour de sa position d'équilibre (ou de repos), il n'a qu'une seule direction de part et d'autre de cette-ci : ce mouvement n'a qu'un degré de liberté. L'énergie communiquée au départ serait intégralement conservée, variant perpétuellement de la forme potentielle, lorsque le ressort est étiré, à la forme cinétique, quant la masse passe par sa position d'équilibre et que sa vitesse est

maximum. A tous moments, par conséquent, la somme des deux types d'énergie est constante.

La force de rappel d'un ressort, nous l'avons dit, est proportionnelle à l'allongement, mais aussi à la raideur (inverse de l'élasticité) de ce ressort. Cette force F est de la forme :

$$F = kx \qquad (9)$$

où k est la raideur en $N \cdot m^{-1}$, et x l'allongement en m.

Quand le ressort est étiré, une certaine quantité d'énergie potentielle W (en joules) lui est communiqué. Puisque une force F va s'exercer de 0 (point de départ) jusqu'à la valeur kx (équ. 9), sa valeur moyenne est 1/2 kx ; pour effectuer ce travail, la force s'applique sur la distance (équ. 7), de sorte nous aurons la relation bien connue :

$$W = \frac{1}{2} kx^2 \qquad (10)$$

On notera que l'énergie est positive quelle que soit le sens de x, puisque la distance est élevée au carré.

La fréquence d'un tel mouvement dépend de son inertie, donc de la masse m (en kg), et de sa raideur k :

$$N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (11)$$

Cette équation indique que la longueur du ressort ne joue aucun rôle pour la fréquence, et que pour doubler celle-ci, il faut diviser la masse par 4 ou multiplier par le même facteur la raideur du ressort.

2.3. Différents types d'oscillations

En dehors du cas théorique expliqué ci-dessus, il existe d'autres types d'oscillations, déterminés par la nature du système vibrant et la

manière dont est appliquée la force d'ébranlement. Nous en étudierons quatre formes principales, qui correspondent aux situations les plus fréquemment rencontrées en musique.

2.3.1. Oscillations entretenues

La force d'entraînement s'exerce de façon constante et continue, compensant à chaque instant les pertes d'énergie dues aux frottements. Les frottements existent toujours, mais sont plus ou moins importants selon les milieux, les corps, ou les systèmes vibrants ; une colonne d'air dans un tuyau est soumise à peu de frottements et conserve bien son énergie ; une corde vibrante, en revanche, la dissipe beaucoup plus vite à cause des contraintes aux points d'attache (sillet, chevalet, cordier), et de sa propre rigidité (frottements des molécules au sein de la corde elle-même).

Grâce à un apport constant d'énergie extérieure, ces mouvements sont donc semblables, pour leur forme, aux oscillations sans frottements du ressort évoqué plus haut.

Ils engendrent des sons périodiques, donc des spectres harmoniques ; mais contrairement à ceux de l'oscillateur harmonique, ils sont complexes (parce que présentant plusieurs degrés de libertés, comme nous le verrons plus loin). Musicalement, c'est le cas des instruments à vent ou à cordes frottées.

2.3.2. Oscillations amorties

La force d'entraînement n'est plus continue, mais s'exerce sous forme de chocs ou d'impulsions ; la durée de l'excitation peut être très brève, et toute l'énergie potentielle est communiquée en une seule fois au corps vibrant, qui met un certain temps à la dissiper. Cette diminution

progressive de l'énergie vibratoire s'appelle amortissement ; l'amplitude diminue, mais la fréquence N reste approximativement constante (fig. 16) :

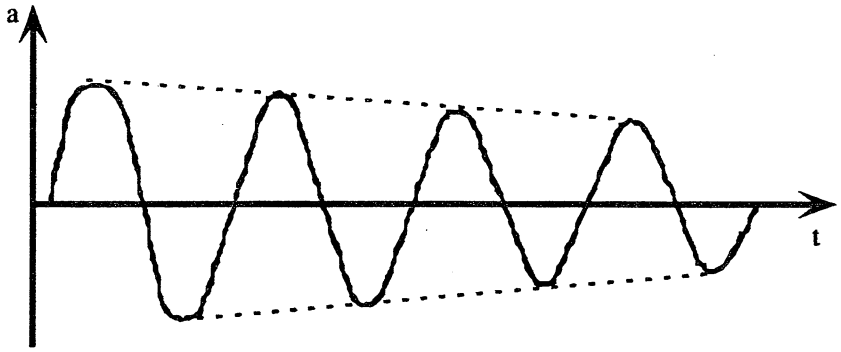


Fig. 16: l'amortissement

Les spectres engendrés par de telles oscillations ne sont pas périodiques, les cycles successifs n'étant pas identiques à eux-mêmes ; les sons correspondants ne sont donc pas harmoniques, et la fréquence ne demeure pas rigoureusement constante sur le plan théorique. C'est le cas des instruments à cordes pincées ou frappées, et des percussions. Mais sur le plan perceptif, surtout si l'amortissement est long, la hauteur ne semble pas varier.

Puisque la courbe de la figure 16 n'est pas périodique, elle est complexe et peut se décomposer en partiels, c'est-à-dire en sinusoïdes non amorties et non multiples entiers du mouvement principal. C'est ce que montre la figure 17 : la courbe amortie N_r est la résultante de la somme des amplitudes des courbes n_1, n_2 et n_3. D'une façon générale, toute altération de la forme d'une sinusoïde signifie la présence d'autres sinusoïdes. Cela signifie qu'en théorie, un son amorti ne devrait jamais cesser, puisque son intensité, constamment divisée en valeurs plus

petites, ne sera jamais égale à zéro. Mais dans le monde réel, les frottements auront tôt ou tard raison de la rigueur mathématique...

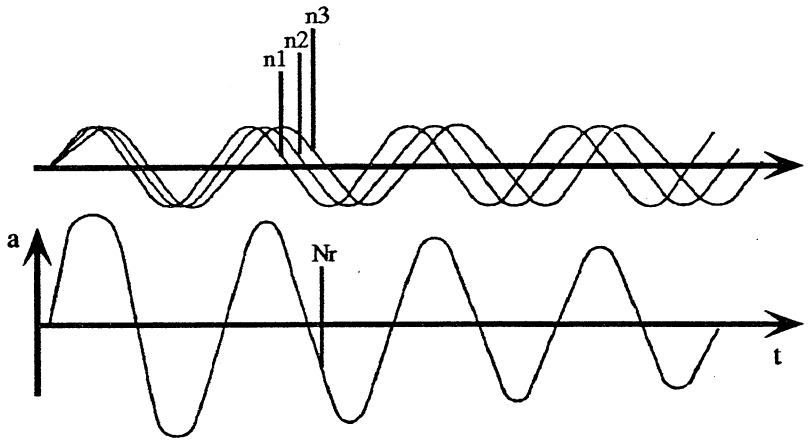


Fig. 17 : décomposition d'un mouvement amorti

2.3.3. Oscillations de relaxation

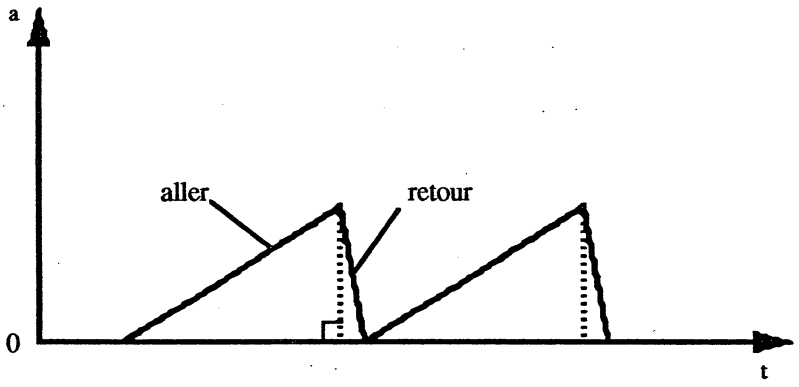


Fig. 18 : oscillation de relaxation

Exerçons une traction sur un élastique fixé à l'une de ses extrémités sur une table, et relâchons-le brusquement : l'ensemble du mouvement constitue un cycle complet, dans lequel la force d'entraînement s'exerce sur la première moitié uniquement, laissant le système libre dans sa

seconde moitié ; la vitesse de l'aller dépend de l'excitation, alors que l'élasticité du système détermine la vitesse du retour.

Décrivons l'évolution du mouvement avec, comme d'habitude, le temps en abscisse et l'amplitude en ordonnée (fig. 18). Cette forme asymétrique nous est déjà familière, c'est la courbe en dents de scie, qui trouve ici son explication mécanique.

Si la deuxième demi-période était parfaitement verticale (trait pointillé), le mouvement équivaudrait à l'addition de l'infinité des harmoniques de tous rangs, ce qui est physiquement impossible, puisque alors un même point devrait se trouver simultanément partout sur le trajet du retour. Cependant plus le retour est rapide, plus le son est riche en harmoniques. Les instruments à anches membraneuses, comme les cuivres, et les instruments à cordes frottées délivrent de telles oscillations.

Le fonctionnement du système archet-corde permet de bien comprendre l'engendrement de telles oscillations. Tout d'abord, il faut savoir que la colophane, dont on enduit le crin de l'archet, possède la double propriété de favoriser l'adhérence de la mèche quand sa vitesse relative par rapport à la corde est petite, et au contraire de favoriser le glissement quand la vitesse relative est grande. Au début d'un cycle, l'archet, posé sur la corde, entraîne facilement celle-ci puisque la vitesse relative est petite ; mais les forces de rappel élastique de la corde deviennent rapidement supérieures à la force d'entraînement de l'archet ; la corde « décroche », et part brusquement en sens inverse, d'autant plus aisément que sa vitesse par rapport à l'archet devient très grande et que la colophane joue à présent son rôle de lubrifiant. De par son élasticité et son inertie, la corde dépasse sa position de repos, atteint son maximum d'amplitude et s'immobilise avant de repartir en sens inverse, rappelée à la fois par son élasticité et par l'archet ; puisque allant de nouveau dans le même sens, la vitesse relative archet-corde redevient

petite, donc l'adhérence maximum, et le mouvement recommence. Le cycle de la corde se compose donc d'un aller lent sous le contrôle de l'archet, et d'un retour rapide dû aux propriétés de la corde. Le nombre de fois que se produit ce mouvement détermine la hauteur du son. La corde transmet cette oscillation de relaxation au chevalet, qui le transmet à la table d'harmonie, qui le transmet aux molécules d'air, et c'est la génération d'une onde, comme nous le verrons plus loin.

2.3.4. Oscillations carrées

Ici, l'entraînement s'exerce sur les deux moitiés du cycle, à l'aller et au retour, mais le mouvement marque un temps d'arrêt non négligeable entre les phases de montée et de descente. Nous reconnaissons le signal carré (fig. 19).

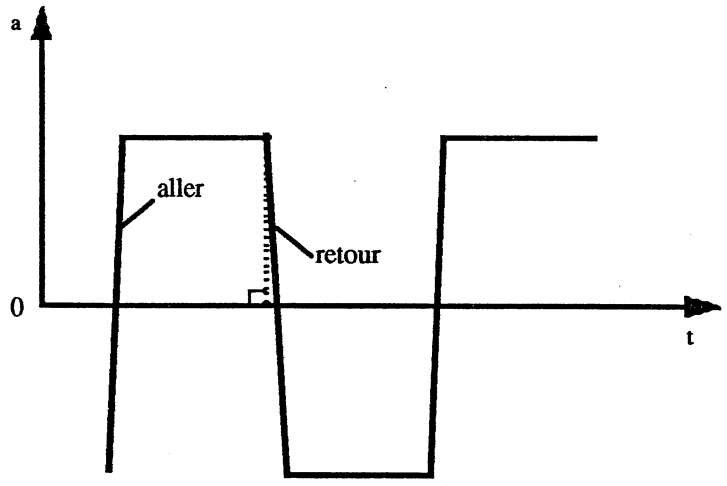


Fig. 19 : signal carré

C'est le mouvement caractéristique du piston dans un cylindre, créant des compressions suivies de décompressions brusques, séparées par des temps de repos plus ou moins longs. Cette forme est principalement produite par les instruments à anche battante comme la

clarinette. Plus les allers et retours se rapprochent de la verticale, plus le son est riche en harmoniques de rangs impairs. L'électronique sait produire des signaux carrés presque parfaits, pour des besoins de mesure.

L'anche de la clarinette effectue des allers et retours rapides, mais les durées d'ouverture et de fermeture du bec sont relativement longues ; il s'agit bien d'oscillations carrées, et c'est la forme directement transmise par l'anche aux molécules d'air pour créer une onde. Si l'anche possède une bonne élasticité, les allers et retours sont très rapides, et donc le son plus riche ; si au contraire l'anche est « molle », la forme du mouvement se rapproche de la sinusoïde et le spectre s'appauvrit en harmoniques.

CHAPITRE III

LA GÉNÉRATION DES ONDES

1. La notion d'onde

Jusqu'à présent, nous avons assimilé le son à des oscillations de différentes formes ; ces oscillations se propagent, en utilisant le support matériel du milieu dans lequel elles sont nées : tous les sons, la musique, le bruit, la parole, sont donc de nature ondulatoire. Nous allons montrer maintenant, au moyen de plusieurs exemples, ce qu'est une onde et comment elle se comporte dans l'espace.

1.1. Onde dans un ressort

Soit un ensemble de six petites masses identiques, numérotées de 1 à 6, reliées ensemble par cinq ressorts (fig. 20). Si l'on frappe le poids 1, celui-ci va se déplacer et comprimer les spires du ressort, qui vont à leur tour pousser le poids 2, puis le poids 3, et ainsi de suite. Après avoir été déplacé, chacun des poids est repoussé en sens inverse par les forces élastiques du ressort. Le mouvement a atteint l'extrémité opposée à la perturbation sans qu'aucune particule de matière ne fasse le trajet complet ; c'est l'énergie qui s'est déplacée, chaque poids ayant oscillé

autour de sa position d'équilibre : une onde s'est propagée longitudinalement, le long du ressort.

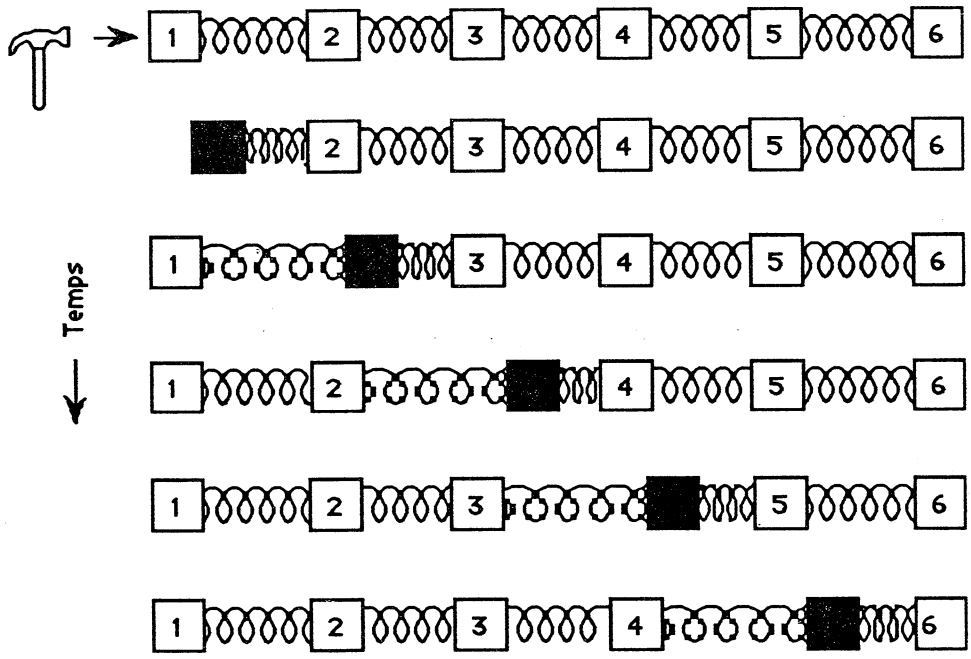


Fig. 20 : onde dans un ressort (1)

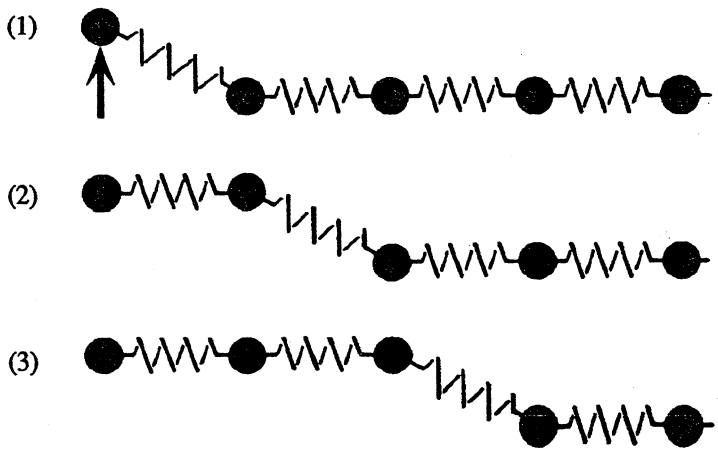


Fig. 21 : onde dans un ressort (2)

Avec un dispositif similaire, il est possible de créer une perturbation différente. Si nous déplaçons la première masse vers le haut (fig. 21 (1)), le ressort exerce une force latérale sur la deuxième masse (2), en la tirant à son tour de côté, la deuxième agit de même sur la troisième (3), et ainsi de suite. L'onde progresse toujours d'un bout à l'autre du ressort, mais cette fois les masses se sont déplacées transversalement au sens de propagation.

1.2. Une pierre dans l'eau

Une pierre jetée dans l'eau en frappe la surface et entraîne vers le fond des molécules[1] d'eau ; arrive un moment où celles-ci, rappelées par leurs forces de cohésion, remontent vers la surface, qu'elles dépassent en raison de leur inertie, puis redescendent, remontent, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'elles n'aient plus assez d'énergie pour se déplacer.

Ces molécules d'eau ont entraîné avec elles leurs voisines, qui elles-mêmes en ont entraîné d'autres, de sorte que le mouvement s'est transmis latéralement. Toutefois, deux remarques s'imposent :

a) au fur et à mesure que l'on s'éloigne latéralement de la perturbation originelle, l'amplitude des oscillations diminue : la transmission latérale dissipe de l'énergie, le mouvement s'amortit ;

b) chaque molécule met un certain temps à transmettre son énergie à sa voisine, créant un décalage de phase progressif entre les mouvements : certaines molécules remontent déjà quand d'autres commencent seulement à descendre (opposition de phase), d'autres sont en phase avec les premières, mais avec une ou plusieurs périodes de retard.

---

[1] Les termes « molécule » ou « particule » ne pas pris ici dans leur sens propre, mais désignent une infime quantité du milieu considéré.

Si infime soit-il, le temps de transmission d'une molécule à l'autre existe et permet d'expliquer pourquoi, après une perturbation, toute la surface de l'eau ne monte pas d'un bloc, mais au contraire « fait des vagues ». C'est ce que montre le dispositif de la figure 22 : toutes les molécules d'eau oscillent verticalement, selon un mouvement pendulaire amorti, et les vagues sont dues aux décalages de phase.

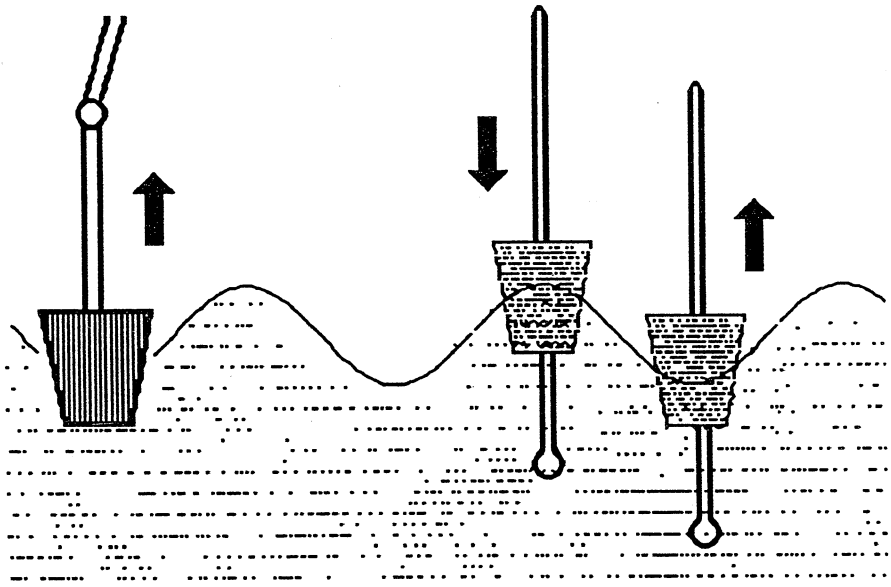


Fig. 22 : décalages de phase

Il n'y a aucun déplacement à distance d'éléments matériels, mais propagation de proche en proche d'oscillations locales des molécules autour de leur position d'équilibre, engendrant une onde se déplaçant horizontalement. Par conséquent, comme dans le deuxième exemple du ressort, aucune molécule ne se déplace dans le sens de l'onde.

1.3. Cas du tuyau

Imaginons un long tuyau rempli d'air, et un piston coulissant à l'une de ses extrémités (fig. 23). L'air possède une masse (le vent est capable de déplacer des objets), donc une inertie. Si le piston pénètre

brusquement dans le tuyau, l'air n'est pas chassé, mais comprimé, en raison de son inertie, au voisinage du piston ; puis cette force de compression se transmet aux « tranches » d'air voisines, jusqu'à l'extrémité opposée. L'onde s'est propagée dans le tuyau, et les molécules d'air ont oscillé sur place autour de leur position d'équilibre (pour l'air, la pression atmosphérique), sans se déplacer à distance.

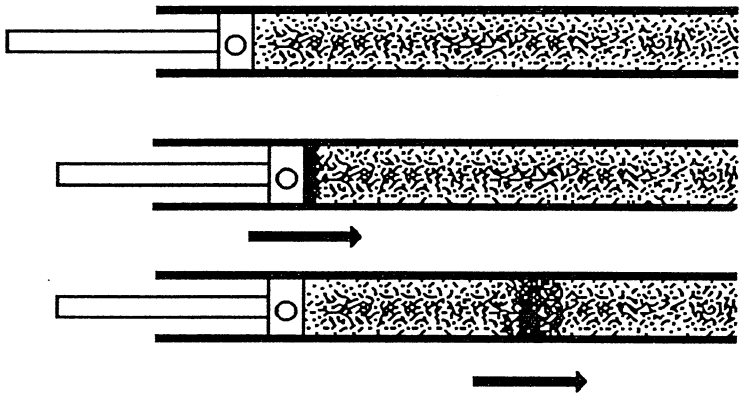


Fig. 23 : onde dans un tuyau

Une compression en un point du tuyau signifie que les molécules d'air sont plus nombreuses à cet endroit ; si maintenant, au lieu d'avancer, le piston recule brusquement, il provoque une raréfaction des molécules, qui tirent alors leurs voisines au lieu de les pousser, exactement comme si elles étaient reliées entre elles par de petits ressorts. Une oscillation rapide du piston engendre par conséquent une suite de compressions et de décompressions qui se propagent dans le tuyau. Sur le ressort de la figure 20, le nombre de spires varie, pour une même unité de longueur, en fonction de l'état de compression ou de décompression du système ; cela est également vrai pour les molécules d'air et visible dans le tuyau de la figure 23. La similitude est donc parfaite entre les masses du ressort et la colonne d'air.

2. Célérité du son

La propagation d'une onde est fonction de la nature du milieu dans lequel elle se propage et de ses variables, température et humidité principalement. N'importe quel milieu peut a priori servir de support : gaz, liquide, solide, cela dépend essentiellement de son élasticité. Cependant le son, différent en cela de la lumière et des ondes électromagnétiques, ne se propage pas dans le vide, ce qui n'est pas surprenant puisqu'il utilise des particules de matière comme vecteur.

La **célérité c**, mesurée en mètres par secondes ($m \cdot s^{-1}$), est la rapidité avec laquelle se déplace une onde. On préfère utiliser le terme de célérité plutôt que celui de vitesse, qui impliquerait un déplacement de matière, ce qui n'est pas le cas pour les ondes sonores, comme nous venons de le voir.

La célérité ne dépend pas de la source émettrice, et notamment pas :

- de son amplitude : des sons *ppp* ou *fff* ont la même célérité ; cette loi, cependant, ne s'applique qu'aux oscillations suffisamment petites, inférieures à la distance entre les particules du milieu. Échappent donc à cette règle les sons violents d'explosion, déflagration et autres, et d'une façon générale, les amplitudes qui déforment le milieu d'une manière irréversible ou dépassant ses propriétés élastiques. Mais aucun son normalement produit par un instrument de musique n'est ici concerné.
- de sa fréquence : une note grave a même célérité qu'une note aiguë[1] ; il ne faut donc pas confondre (ou assimiler) la vitesse d'une vibration (lente pour les sons graves, rapide pour les aigus) et la célérité de l'onde correspondante, qui reste la même.
- de sa nature, de son timbre, ni de la forme de l'onde.

Elle dépend uniquement du milieu de propagation, c'est-à-dire, sur un plan physique, des temps d'échange entre énergie potentielle et énergie

---

[1] Contrairement à ce que croyaient les Grecs, notamment Platon (cf. *Timée*).

cinétique, donc de son élasticité (inverse de la raideur), et de sa masse. Dans le cas du ressort de la figure 20, dans lequel la propagation est longitudinale, nous avons :

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (12)$$

où ρ (lettre grecque ro) est la densité linéique, c'est-à-dire la masse par unité de longueur (exprimée en kilogrammes par mètres), et E le module d'élasticité, dit « module d'Young ». Mais attention à l'interprétation de cette valeur : E est la force en newtons qu'il faut appliquer à une barre pour l'allonger d'une certaine longueur : plus la barre est rigide, plus grande doit être la force, et donc plus élevé le module d'Young. Le module d'élasticité d'un corps est de ce fait inversement proportionnel à son élasticité. Plus la densité d'un matériau est grande par rapport à son élasticité, plus la célérité y est élevée. C'est pourquoi le son est beaucoup plus rapide dans les solides que dans les gaz, l'air notamment.

Dans une perturbation transversale (fig. 21), cas important puisque nous verrons plus loin qu'il concerne les cordes vibrantes, la célérité dépend de la tension τ (lettre grecque tau) du système et de sa densité linéique :

$$c = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \qquad (13)$$

Pour les milieux continus, les fluides comme l'air, la thermodynamique montre que les conditions d'« élasticité » sont déterminées par le produit γp, γ étant une constante dépendant du gaz[1] qui vaut $\sqrt{2}$, soit 1,41 pour l'air, et p la pression ambiante. L'expression devient donc :

---

[1] γ est en réalité le rapport des chaleurs spécifiques principales.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \qquad (14)$$

Ainsi, par exemple, à 0°C et à la pression atmosphérique normale de $1{,}013 \cdot 10^5$ Pa, la densité volumique de l'air est de 1,29 kg/m^3. La célérité du son vaut donc :

$$c = \sqrt{\frac{1{,}4 \times 1{,}013 \times 10^5}{1{,}29}} = 331{,}5 \text{ m·s}^{-1}$$

Dans la formule 14, les termes p et ρ dépendant de la température absolue T en degrés Kelvin, c'est-à-dire de la température θ (lettre grecque thêta) ambiante en degrés Celsius + 273,15. Il en ressort une formule simplifiée permettant de calculer avec une approximation correcte la célérité du son dans l'air, connaissant la température :

$$\underline{c = 20\sqrt{T}} \qquad (15)$$

Pour une température de 25°C, la célérité serait :

$$20 \times \sqrt{273{,}15 + 25} \approx 345 \text{ m·s}^{1}$$

Dans les cas une plus grande précision s'avérerait nécessaire, il faut utiliser la formule suivante :

$$c = c_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\theta}{\theta_{k0}}} \qquad (16)$$

avec :

c_0 : célérité du gaz à 0°C
θ : température du gaz
θ_{k0} : 0° Kelvin (–273, 15 C°)

ce qui donne dans l'air :

$$c = 331{,}5 \cdot \sqrt{1 - \frac{\theta}{-273{,}15}}$$

La formule 14 pourrait laisser croire que la célérité d'une onde dépend de la pression p. Mais quand la pression d'un gaz augmente, pour une température constante, la densité augmente dans la même proportion, de sorte que le quotient p/ρ demeure inchangé. En revanche, nous avons pu constater que la célérité augmente avec la température ; ce fait est d'une importance capitale pour la justesse de tous les instruments à vent, puisque nous verrons que la fréquence d'un tuyau est précisément proportionnelle à la célérité du son.

Voici la valeur de la célérité mesurée dans quelques milieux usuels :

eau :	1450 $m \cdot s^{-1}$	épicéa :	4500 $m \cdot s^{-1}$
béton :	1500 $m \cdot s^{-1}$	acier :	5100 $m \cdot s^{-1}$

Dans l'air, en tenant compte de l'état thermodynamique du milieu, les valeurs calculées sont les suivantes :

331,5 $m \cdot s^{-1}$	337 $m \cdot s^{-1}$	340 $m \cdot s^{-1}$	343 $m \cdot s^{-1}$	353 $m \cdot s^{-1}$
0°	10°	15°	20°	37°

La célérité augmente également avec l'humidité, jusqu'à 2 m/s par rapport à de l'air sec, ce qui n'est pas négligeable, dans le cas des tuyaux d'orgues notamment.

La célérité du son est bien moins grande que celle de la lumière, qui parcourt approximativement 300 000 km en une seconde. C'est ce qui explique pourquoi, pendant l'orage, on voit l'éclair avant d'entendre le tonnerre. Déjà, au début du XVII^{ème} s., Mersenne s'était servi de ce décalage pour mesurer la célérité du son dans l'air en chronométrant l'intervalle de temps séparant l'éclair de la détonation d'un coup de fusil dont il connaissait la distance. En 1738, l'expérience est recommencée par Cassini, l'abbé La Caille et Maraldi, mais cette fois avec un canon tiré à Montmartre et observé à Montlhéry : le son mit 68 secondes à parcourir le trajet (environ 23 km), sa célérité fut estimée à 173 toises par seconde (337 m/s). Arago repris l'expérience à son tour en 1822, avec des coups tirés entre Villejuif et Montlhéry. Résultat : 330,6 m/s à 0°C.

Entre temps, en 1808, J.-B. Biot utilisa une canalisation cylindrique des aqueducs de Paris longue de 951 m et une cloche pour obtenir une valeur plus précise. Il fit également jouer des airs de

musique pour savoir si au bout du tuyau la mélodie était respectée, et si les aigus allaient aussi vite que les graves...

Certaines expériences furent plus héroïques encore : Colladon et Sturm, en 1841, mesurèrent la célérité du son sous l'eau du lac de Genève, entre Rolle et Thonon (14 km, 140 m de profondeur moyenne) à l'aide d'une cloche immergée de 65 kg et d'une charge de poudre de 125 grammes. Ils trouvèrent 1 435 m/s.

3. La longueur d'onde

3.1. Mesure de la longueur d'onde

La longueur d'onde λ (lettre grecque lambda) est la distance parcourue par l'onde en une période T : elle s'exprime en mètres. Cette distance est donc celle qui sépare deux maxima d'amplitude, deux zones de compression maximum, ou n'importe quels points homologues de la courbe de l'onde (fig. 24) :

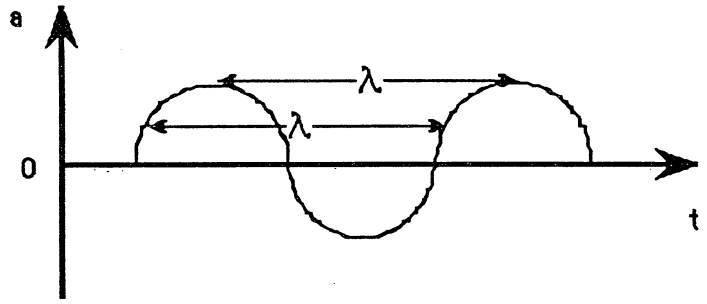


Fig. 24 : la longueur d'onde

D'une façon générale, une distance L parcourue est égale au produit de la vitesse v par la durée t du parcours, soit D = vt. Il en va de même pour une onde, ce qui donne :

$$\boxed{\lambda = cT} \qquad (17)$$

et comme la période T est l'inverse de la fréquence N :

$$\boxed{\lambda = \frac{c}{N}} \qquad (18)$$

Cette relation simple permet de trouver un paramètre si l'on connait les deux autres : $N = \frac{c}{\lambda}$ et $c = \lambda N = \frac{\lambda}{T}$

Un diapason donnant le la_3 (à 15°C) possède une longueur d'onde de 0,77 m ; cela signifie qu'il émet dans l'espace environnant des compressions successives espacées de cette distance.

On voit immédiatement (équ. 18) que la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence : les sons aigus mesurent quelques centimètres de longueur d'onde (15 000 Hz = 3 cm), les graves plusieurs mètres (20 Hz = 17 m). D'autre part, comme la fréquence reste constante au cours de la propagation, si l'onde traverse des milieux différents (comme c'est généralement le cas), sa célérité change et sa longueur varie en conséquence. Il faut tenir compte de ces modifications en acoustique architecturale, et dans le choix des matériaux isolants pour l'insonorisation.

3.2. L'effet Doppler

L'effet Doppler est phénomène très courant dans notre environnement, même s'il n'a que peu d'incidence sur la pratique musicale. Si un mobile, doté d'une vitesse relative suffisante par rapport à un observateur, émet un son, celui-ci change de hauteur pour l'observateur. Par exemple, un piéton entendant passer une sirène d'automobile roulant suffisamment vite entend la sirène d'abord plus aiguë, quand le véhicule s'approche, puis plus grave, après son passage, lorsqu'il s'éloigne. L'effet se produit également dans la situation inverse, si la source sonore est fixe et l'observateur en mouvement, par exemple un voyageur dans un train entendant la sonnerie d'un passage à niveau.

La variation de la fréquence entendue dépend de la vitesse relative source/auditeur. Si une source émet un son de 100 Hz en s'approchant à

la vitesse de 10 m/s, la longueur d'onde diminue d'autant, d'où un accroissement correspondant de la fréquence : à la célérité normale s'additionne la vitesse du mobile, soit N = (340 + 10) ÷ 3,4 = 103 Hz. Phénomène symétrique pour l'éloignement, la longueur d'onde est augmentée — donc la hauteur baissée — par la diminution de la célérité relative.

4. Forme des ondes

Selon leur mode d'engendrement et leur milieu de propagation, les ondes sonores se présentent sous différentes formes.

4.1. Ondes longitudinales

Les ondes longitudinales se propagent dans le même sens que les oscillations des molécules qui leur donnent naissance. Deux des exemples que nous avons déjà rencontrés répondent à cette définition : dans le cas du ressort (fig. 20), les poids oscillaient dans le sens de la longueur, tout comme les molécules d'air du tuyau de la figure 23.

On appelle **front d'onde** l'extrémité du rayonnement sonore émis par sa source. Cette surface vibrante est une ligne droite pour une onde se propageant dans un tuyau cylindrique, et une ligne courbe pour un tuyau conique. Le **train d'ondes** est constitué de l'ensemble des compressions et réfactions qui déforment le milieu.

L'onde, ainsi canalisée en une seule dimension, conserve parfaitement bien son énergie, comme en témoignent les nombreux usages du tuyau acoustique : autrefois les cornets auditifs pour les sourds ou, dans les demeures bourgeoises, un « téléphone » constitué de longs tubes de caoutchouc circulant entre les étages et permettant de communiquer grâce à un entonnoir terminal ; aujourd'hui le stéthoscope du médecin

repose toujours sur le même principe. C'est enfin l'une des raisons pour lesquelles les instruments à vent sont moins nombreux, au sein de l'orchestre symphonique, que les instruments à cordes, qui présentent un moindre rendement.

4.2. Ondes transversales

Contrairement aux précédentes, ces ondes se propagent perpendiculairement (ou transversalement) aux oscillations des molécules. Le ressort de la figure 21 et la pierre jetée dans l'eau donnent naissance à une telle onde : à un mouvement vertical des particules d'eau correspond une propagation ondulatoire horizontale, parallèle à la surface ; dans le ressort, aucune masse n'effectue d'oscillation dans le sens longitudinal.

Les ondes transversales constituent une part importante de notre environnement sonore, puisqu'elles sont produites entre autres par les cordes vibrantes.

4.3. Ondes circulaires

Quand une onde se propage sur une surface (fig. 25), comme une membrane tendue, le front d'onde s'éloigne de la source S à la manière de cercles concentriques. La longueur d'onde est alors évidemment la distance qui sépare deux circonférences. Dans ce cas, l'onde est à deux dimensions (celles d'un plan) et non plus à une, comme dans les cordes et les tuyaux. Leur théorie est nettement plus difficile à établir, car leurs paramètres (tension, contraintes...) ne peuvent se réduire à des unités simples.

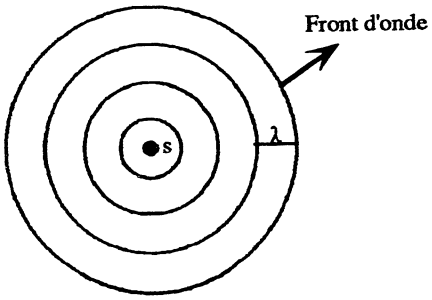


Fig. 25 : ondes circulaires

4.4. Ondes sphériques

Elles sont proches, dans- leur principe, des ondes circulaires, mais se propagent dans un espace à trois dimensions ; c'est le cas des sons émis en champ libre. La perturbation est le centre d'une sphère, la propagation se fait dans toutes les directions, suivant le rayon de cette sphère, et le front d'onde, correspondant à la surface, est courbe.

Dans un tel cas, l'amortissement est très important : d'abord, l'énergie de la source est répartie sur une surface beaucoup grande que pour une pour une onde longitudinale ; ensuite, comme l'indique la formule de la surface de la sphère, $S = 4\pi r^2$, à chaque doublement du rayon, la surface est quadruplée ; r étant la distance que parcourt l'onde, son énergie se dissipe donc très vite (cf. chap. suivant). C'est du moins le cas pour une distance relativement proche de la source : mais lorsque la distance parcourue est importante[1], la surface de la sphère devient considérable, et telle que son rayon de courbure peut être assimilé à une droite : l'onde devient plane, la distance n'intervient presque plus, et ne subsiste que l'amortissement dû au milieu de propagation.

---

[1] L'évaluation d'une « grande » ou d'une « petite » distance dépend en toute rigueur de la longueur de l'onde, plus précisément du rapport r/λ ou L/λ. Pour fixer les idées, disons qu'une distance d'une vingtaine de mètres est grande.

CHAPITRE IV

LA PROPAGATION DES ONDES

1. L'énergie des ondes sonores

Une source produisant un son continu doit fournir de l'énergie pour alimenter chaque compression de l'onde. Si ce n'est pas le cas, le mouvement s'amortit (cf. p. 40). L'énergie n'est pas seulement absorbée par les forces de frottements et de frictions : sa transformation en onde sonore, c'est-à-dire sa transmission à l'air environnant, en constitue la principale dépense. Le processus par lequel une source vibrante communique son énergie à un milieu s'appelle **rayonnement.**

Pour un instrument de musique, seule une fraction de la puissance fournie est transformée en ondes sonores ; cette partie, généralement très faible et presque toujours inférieure à 2 %, constitue le rendement de l'instrument.

Dans le cas d'une onde sphérique, la puissance se répartit en surfaces successives qui croissent avec le rayon. La mesure de cette puissance, relevée pour une unité de surface, est **l'intensité** de l'onde. Avec P la puissance en watts de la source et r le rayon de la sphère, c'est-à-dire la distance en mètres à la source, l'intensité I en w/m^2 est égale à :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad (19)$$

Si une trompette développe une puissance de 10^{-3} w à la sortie du pavillon, son intensité acoustique à 2 m de distance vaut :

$$I = \frac{10^{-3}}{4\,\pi\,(2)^2} = 1{,}99 \cdot 10^{-5}\ w/m^2$$

L'intensité sonore décroît avec le carré de la distance. La formule 19 n'est en toute rigueur valable que si l'onde se propage en champ libre, sans réflexions (cf. infra). Elle reste toutefois applicable pour les sources directionnelles, comme les instruments de musique, qui ne rayonnent pas leur énergie uniformément tout autour d'elles : la mesure de l'intensité est alors effectuée sur un plan perpendiculaire à l'axe de propagation.

En plus de cette atténuation, dite géométrique, il existe un autre facteur dû à la viscosité de l'air. On démontre que l'affaiblissement d'une onde est proportionnel à la distance parcourue et au carré de sa fréquence. Ceci explique que les aigus soient plus absorbés que les graves au cours de la propagation, la viscosité n'intervenant qu'à partir de 1 000 Hz environ. Cette diminution d'intensité n'intervient que sur de grandes distances, et n'est pas perceptible dans une salle de concert.

2. La réflexion

Les ondes ne se propagent que rarement en champ libre. Dans la réalité, il existe presque toujours des obstacles qui modifient leur comportement.

Lorsqu'une onde aérienne rencontre un obstacle, elle est renvoyée, réfléchie par cette obstacle. L'énergie se transmet de molécules en molécules oscillant sur place jusqu'à une dernière, en contact avec un

obstacle rigide, qu'elle ne peut déplacer ; ne pouvant lui transmettre son énergie potentielle, elle la redonne entièrement à la molécule qui la lui avait communiquée et l'énergie repart en sens inverse. C'est le phénomène de réflexion (fig. 26) :

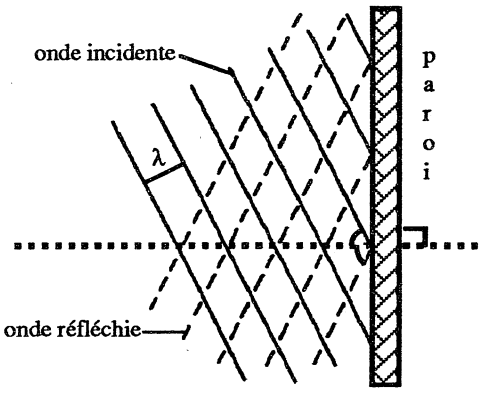


Fig. 26 : réflexion des ondes

On appelle **onde incidente** celle qui arrive sur l'obstacle (en traits pleins sur la figure), et **onde réfléchie**, celle qui est renvoyée en sens inverse (en tirets) ; $\hat{i}$ et $\hat{r}$ sont les angles formés par rapport à la perpendiculaire de l'obstacle (en pointillés). Comme pour la lumière, l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, soit : $\hat{i} = \hat{r}$. L'onde réfléchie est moins intense que l'onde incidente, pour cause d'absorption et de réfraction (cf. infra).

Selon la nature et la taille des obstacles, différents cas de réflexions peuvent se présenter.

2.1. Réverbération

2.1.1. Définition

Quand un auditeur écoute un musicien dans une salle de concert, il reçoit tout d'abord un son direct qui correspond au trajet le plus court,

puis un deuxième front d'onde, après une première réflexion sur la paroi la plus proche, puis un troisième, un quatrième, etc., jusqu'à extinction de l'onde (fig. 27).

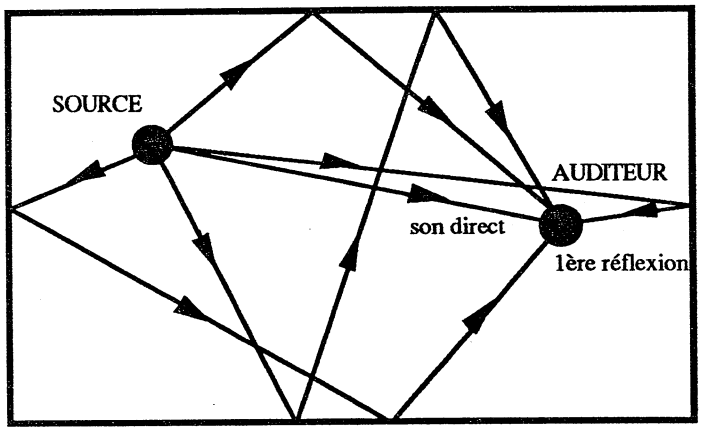


Fig. 27 : réflexions multiples

Ces arrivées successives sont si rapprochées les unes des autres que l'oreille ne peut les séparer : elles fusionnent, le son semble s'allonger temporellement, et la salle « résonne » comme cela se produit dans les églises, par exemple, dont les murs en pierre sont très réfléchissants.. Cette fusion des multiples réflexions s'appelle **réverbération.**

La figure 28 explique le principe de la réverbération : la durée s'écoulant entre deux retours successifs est inférieure au pouvoir séparateur temporel de l'oreille.

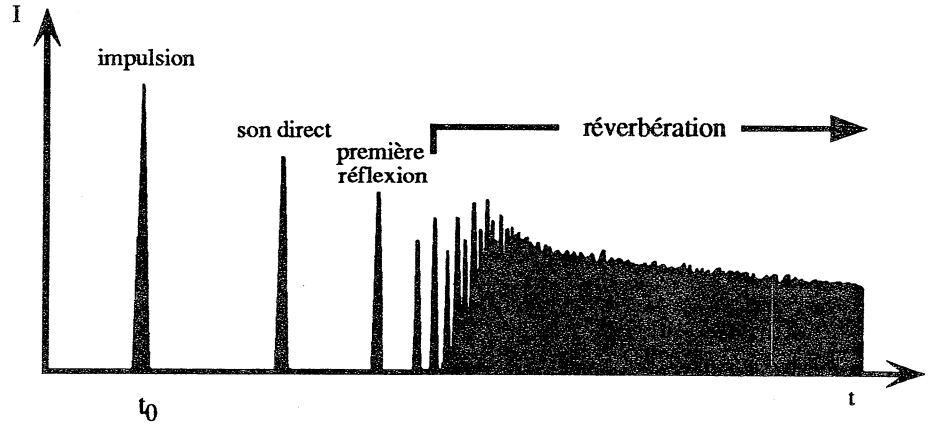


Fig. 28 : principe de la réverbération

2.1.2. Le temps de réverbération

Le **temps de réverbération** (TR) est l'une des caractéristiques les plus importantes d'une salle, et donc intéressant à connaître ; en voici la définition : *le temps en secondes mis par une impulsion de 1000 Hz à baisser de 60 dB*[1] *après interruption brusque* :

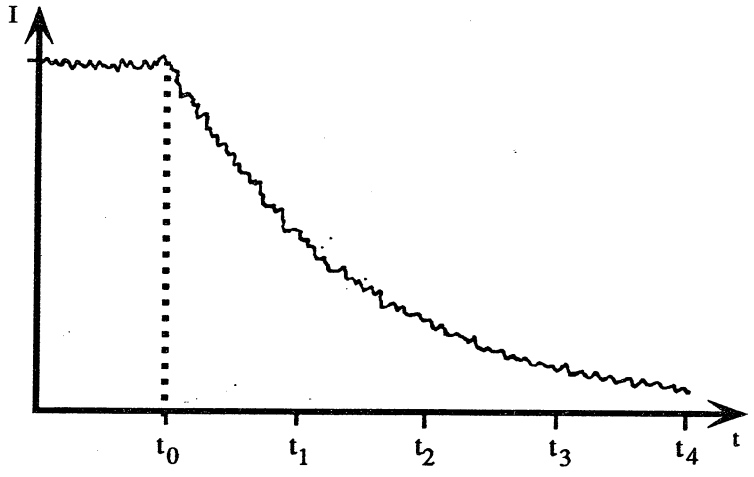


Fig. 29 : le temps de réverbération

1 Le décibel (abrégé en dB) est une unité d'intensité (cf. chap X).

La figure 29 représente la décroissance d'un son interrompu subitement à l'instant t_0, l'intensité étant ensuite mesurée à des intervalles de temps égaux : à t_1, elle a baissé de moitié par rapport à t_0, à t_2 de moitié par rapport à t_1, et ainsi de suite. Sur un plan mathématique, on constate que le son ne devrait jamais s'arrêter, puisque une quantité divisée par deux ne donne jamais zéro. En pratique, on considère une décroissance de 60 dB ; si la définition ci-dessus précise la fréquence de l'impulsion sonore, c'est parce que l'absorption des matériaux varie en fonction d'elle (cf. infra).

En résumé, le TR définit la durée avec laquelle un son décroît dans un lieu à partir de sa suppression. L'Américain Wallace Sabine, véritable fondateur, au début du siècle, de l'acoustique architecturale moderne[1], énonça trois lois fondamentales sur la réverbération :

1. Le taux de décroissance du son dans une salle est pratiquement le même en tous points ;
2. Le taux de décroissance d'un son dans une salle ne dépend pratiquement pas de la position de la source ;
3. La position d'un matériau absorbant dans une salle n'influe pratiquement pas sur le taux de décroissance d'un son.

Mais surtout,après de nombreuses expériences effectuées entre 1920 et 1925 à l'Université de Harvard, Sabine mit au point sa célèbre formule permettant de calculer le temps de réverbération d'une salle :

$$TR = 0{,}161 \frac{V}{S\alpha} \qquad (20)$$

V est le volume en m^3 de la salle

S est la surface en m^2 des parois

α est le coefficient d'absorption moyen des parois (cf. § 3 infra).

---

1 Voir le recueil des principaux articles de Sabine (1868-1919), *Collected Papers on Acoustics*, New York, ^{2}1964.

Le TR est donc proportionnel au volume de la salle et inversement proportionnel au produit de la surface des parois par leur coefficient d'absorption. Si, comme c'est presque toujours le cas dans la réalité, les murs sont recouverts de matériaux différents, le pouvoir d'absorption total A est égal à la somme des pouvoirs d'absorption de chacun des murs, c'est-à-dire :

$$A = \sum \alpha_i S_i \qquad (21)$$

où α_i est le coefficient d'absorption de la surface S_i.

L'inconvénient de la formule (21) de Sabine est d'obtenir un TR non nul pour un coefficient α égal à 1, c'est-à-dire pour une salle totalement absorbante. C'est pourquoi les acousticiens préfèrent employer une autre formule, celle d'Eyring, dans les cas où l'absorption est importante :

$$TR = 0{,}161 \frac{V}{-S \ln(1-\alpha)} \qquad (22)$$

Cette expression remplace simplement α par $-\ln(1-\alpha)$ et n'a évidemment de sens que pour $\alpha < 1$. On peut encore perfectionner les calculs en prenant en compte davantage de paramètres, mais les formules ne donnent jamais rigoureusement les mêmes valeurs que celles obtenues au moyen de mesures. L'approximation reste toutefois largement suffisante dans de nombreuses situations.

Dans une salle de conférence, où importe avant tout l'intelligibilité de la parole, le TR sera de l'ordre de 1 s environ ; pour la musique, une telle salle serait jugée beaucoup trop « sèche », et un bon TR devrait être compris entre 2 et 3 s. Mais tout cela dépend essentiellement du lieu, de son architecture, du style de la musique, et, par exemple, le TR de la cathédrale Notre Dame de Paris dépasse 8 s. Dans de telles conditions, un orateur voulant se faire comprendre doit adopter un débit extrêmement lent, afin de limiter la superposition non seulement de syllabes, mais de mots entiers.

Le temps de réverbération n'est pas le seul paramètre à influer sur la qualité d'une salle. Deux lieux A et B peuvent avoir des volumes très différents mais un TR identique : cela dépend entre autres du revêtement de leurs parois. Dans B, moins spacieux que A, la première réflexion parviendra plus vite à l'auditeur puisque le trajet est plus court : cette valeur, précisément appelée **délai de 1ère réflexion** et exprimée en millisecondes, confère à l'écoute l'impression de volume, d'espace. De plus, dans une petite salle, la **densité de réflexion** sera plus importante, à TR égal, que dans une plus grande. Là encore, l'image sonore du lieu en dépendra.

La réverbération joue un rôle esthétique important dans la transmission musicale. Au concert, c'est en quelque sorte la « voix de la salle » qui se mêle à celle de l'exécutant et facilite (ou entrave) le contrôle de son jeu. Dans les enregistrements actuels, on utilise le plus souvent une réverbération et un délai artificiels, réalisés électroniquement et entièrement paramétrables.

2.2. Écho

2.2.1. Écho simple

Phénomène connu depuis des millénaires, l'écho consiste en une réflexion unique, séparée de l'onde directe par un silence nettement perceptible. Il se produit souvent en plein air, où l'absence de parois latérales et de plafond empêche sa répétition. A l'inverse, la réverbération se présente donc comme une suite d'échos enchaînés les uns aux autres. Si l'écho est plus rare dans un lieu clos, il peut néanmoins se produire lorsque plusieurs réflexions parviennent à l'auditeur au même moment : l'addition de leur intensité provoque une « crête » dans la courbe de décroissance du son et donne naissance à une perception différenciée.

Dans une salle de concert, c'est bien sûr un grave inconvénient, auquel il faut remédier par un traitement acoustique approprié.

Un écho permet d'évaluer la distance de la source à la surface réfléchissante :

Exemple : si un son met 3 s à revenir, à quelle distance se situe l'obstacle ? En 3 s le son a parcouru 3 x 340 m = 1020 m, correspondant à un aller et un retour. L'obstacle réfléchissant se trouve donc à 1020 ÷ 2 = 510 m.

À partir de quel intervalle de temps peut-on percevoir un écho, ou plus exactement quel durée minimum peut s'écouler entre l'émission d'un son et sa première réflexion pour entendre cette dernière distinctement ? Cela dépend évidemment de l'oreille de chacun, et plus précisément de son pouvoir séparateur temporel, mais la valeur moyenne couramment admise est un écart de 50 millisecondes entre l'émission et la réception. Cela signifie qu'un obstacle réfléchissant peut théoriquement provoquer un écho à partir d'une distance de 8,50 m, à 15°C.

2.2.2. Échos multiples

Dans certaines circonstances, plusieurs échos peuvent revenir sur l'auditeur, qui les distingue individuellement. Un claquement sec entre deux parois se réfléchit alternativement sur l'une et sur l'autre, et peut être perçu à chaque passage. Si les surfaces réfléchissantes sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, l'auditeur percevra une salve d'impulsions à caractère périodique, appelée **écho flottant** (ou *flutter echo*).

Mais si les deux parois sont assez proches, par exemple à 2 m l'une de l'autre, les échos seront nombreux en 1 s (170 dans ce cas), et agiront comme autant d'impulsions susceptibles de créer une sensation de hauteur périodique, en l'occurrence de 170 Hz, totalement indépendante de la fréquence de l'onde : c'est **l'écho tonal**.

Dans les deux cas précédents, l'écho est **répétitif** parce que l'onde emprunte plusieurs fois le même trajet. Mais la répétition peut être le fait de plusieurs surfaces réfléchissant tour à tour la même onde sonore (fig. 30).

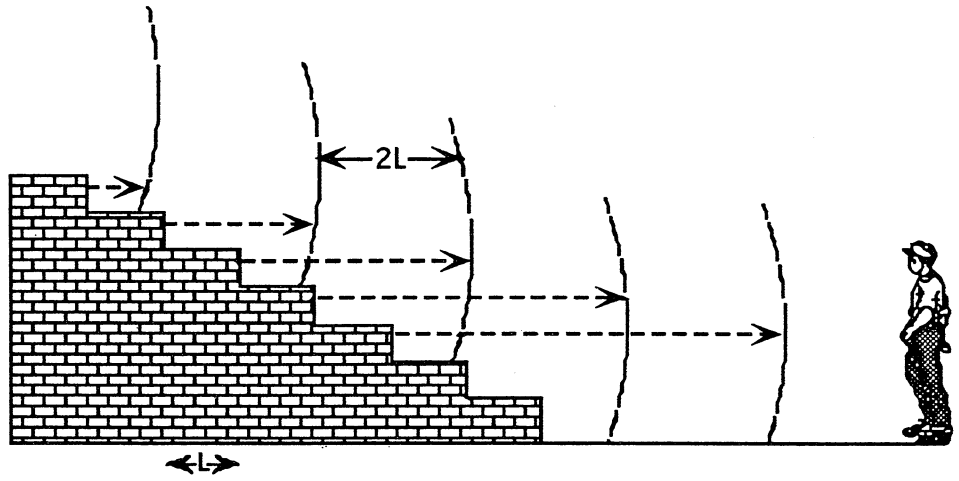


Fig. 30 : écho tonal

Les gradins des amphithéâtres, par exemple, présentent une succession de petites parois verticales pouvant renvoyer la voix des acteurs. Soit L la largeur séparant deux gradins : l'écart T séparant deux échos successifs est égal à 2L (trajet aller et retour), que divise la célérité du son c, soit :

$$\boxed{T = \frac{2L}{c}} \qquad (23)$$

T est la période de l'écho. Sa fréquence est donc égale à :

$$N = \frac{c}{2L} \qquad (24)$$

Si les gradins mesurent 77 cm de largeur, la fréquence de l'écho sera égale à :

$$\frac{340}{2 \cdot (0{,}77)} \approx 220 \text{ Hz}$$

Une telle fréquence correspond à la hauteur du la_2, une octave au-dessous du diapason. Cette forme de réflexion prend le nom **d'écho tonal.**

Il est évident que seuls les acteurs faisant face aux gradins perçoivent l'écho tonal ; les spectateurs assis sur les marches n'ont pas cette possibilité.

2.3. Focalisation

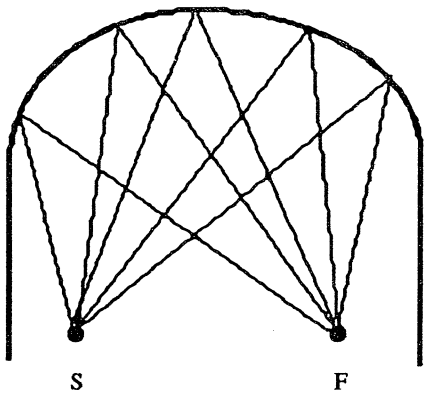


Fig. 31 : la focalisation

La figure 31 représente un cas particulier de réflexion sur certaines voûtes ou surfaces courbes. Les ondes sonores émises à partir d'une source S se réfléchissent et se focalisent en un point F, symétrique de S. Le rayonnement sonore est donc focalisé, concentré en un espace restreint, renforçant l'intensité à cet endroit. Si l'onde incidente est de faible amplitude, le son n'est entendu qu'au point focal, et le reste de la salle reste pratiquement silencieux.

> Comme l'écho, la focalisation est connue depuis l'Antiquité, et souvent utilisée par les prêtres et les oracles. Les sons focalisés n'étaient pratiquement audibles qu'en un point précis, et la source pouvait n'être pas visible, d'où des possibilités d'espionnage (Oreille de Denys l'Ancien à Syracuse). Le procédé fut également employé au Moyen Age pour la confession des lépreux : une voix chuchotée était ainsi facilement transmise à distance, sans indiscrétion pour le

pêcheur, et sans risque pour le confesseur. Certaines stations du métro parisien possèdent encore des voûtes où la focalisation fonctionne très bien (pour un essai, éviter l'heure d'affluence...)

3. L'absorption

3.1. Le coefficient d'absorption

Les différents matériaux sur lesquels frappent les ondes sont plus ou moins élastiques, c'est-à-dire possèdent plus ou moins la faculté de réfléchir l'énergie qui leur parvient. Un matériau est d'autant plus absorbant qu'il est moins réfléchissant.

Sur le plan acoustique, le phénomène s'explique aisément : l'onde qui se propage atteint un obstacle dont les molécules sont comprimées, tout comme celles de l'air ; si cet obstacle est fortement absorbant, donc peu élastique, il ne reprend pas sa forme initiale après déformation, et une partie seulement de l'onde est réfléchie.

L'intensité réfléchie I_r est forcément moindre que l'intensité incidente I, par suite de l'intensité absorbée I_a, d'où :

$$I_a = I - I_r \qquad (25)$$

En pratique, chaque matériau peut être caractérisé par un **coefficient d'absorption** α (lettre grecque alpha) qui mesure le rapport entre l'intensité absorbée et l'intensité incidente, soit :

$$\boxed{\alpha = \frac{I_a}{I}} \qquad (26)$$

Si toute l'intensité était réfléchie, $I_r = I$, et d'après la formule 25, $I_a = 0$, avec pour conséquence $\alpha = 0$; si toute l'intensité était au contraire absorbée, c'est-à-dire $I_r = 0$, nous aurions $I = I_a$, et d'après 26, $\alpha = 1$.

La connaissance des coefficients d'absorption est importante dans les techniques d'insonorisation et pour le traitement acoustique des lieux

d'écoute en général. A titre indicatif, voici quelques coefficients à la fréquence 1000 Hz pour des matériaux courants :

MATÉRIAU	Coefficient α à 1 KHZ	
Briques	0,04	7
Contre-plaqué	0,15	5
Marbre (peu absorbant)	0,01	8
Moquette fine sur béton	0,30	3
Plancher en bois	0,20	4
Plâtre isolant (très absorbant)	0,90	1
Tapis épais	0,50	2
Vitres	0,05	6

Dans la plupart des cas, l'absorption augmente avec la fréquence, dans des proportions variables selon les matériaux. Une salle insonorisée privilégie donc les graves, et le timbre des instruments de musique est sensiblement modifié par l'élimination des harmoniques élevés.

L'air, tout comme les matériaux solides, joue un rôle dans l'absorption du son : ce phénomène est négligeable quand les distances de propagation sont courtes, comme dans une petite salle de concert, mais appréciable déjà dans une grande salle ; le coefficient α de l'air augmente avec la fréquence du son et la température, diminue avec l'humidité. Un concert en plein air n'a pas les mêmes sonorités par un temps chaud et sec, que dans une atmosphère fraîche et humide... Ce sont toujours les composants élevés des spectres sonores qui font la différence.

3.2. Le pouvoir d'absorption[1]

Le pouvoir d'absorption A d'un matériau à une fréquence donnée est égal au produit de la surface du matériau par son coefficient α à cette fréquence (cf. § 2), et s'exprime en unités de surface (m^2)[2].

Ce paramètre permet de déterminer rapidement — avec une bonne approximation — la diminution N en décibels du niveau sonore, dans un lieu, après traitement d'insonorisation. La formule à utiliser est :

$$N_{dB} = 10 \log \frac{A_2}{A_1} \qquad (27)$$

où A_2 et A_1 sont les pouvoirs d'absorption totaux des parois respectivement après et avant traitement.

A titre d'application, supposons une salle dont la surface intérieure totale est de 2232 m^2, répartis ainsi (le coefficient α d'absorption est chaque fois donné à la suite, pour 1 KHz) : 360 m^2 de briques enduites (0,10), 1080 m^2 de boiseries (0,20), 32 m^2 de vitres (0,05), et 760 m^2 de panneaux acoustiques (0,15). Son pouvoir total d'absorption vaut, après calcul, environ 368 unités. Si l'on recouvre maintenant 1000 m^2 de bois par un revêtement insonorisant ($\alpha = 0{,}7$), le total absorbant passe à 1068 unités. D'après l'équ. 27, l'atténuation N sera de l'ordre de :

$$N = 10 \log \frac{1068}{168} = \boxed{8\ dB}$$

Cette faible valeur indique bien qu'il est inutile de ne traiter qu'une partie de la salle si l'on désire obtenir des résultats significatifs.

---

1 Ce paragraphe doit être lu après le chapitre X par les étudiants non familiarisés avec le maniement le calcul logarithmique.

2 Les Anglo-saxons utilisent le « sabine », correspondant à la surface en pieds carrés.

4. La diffraction

D'une façon générale, la diffraction consiste, pour une onde, à contourner un obstacle, ou passer à travers une ouverture (trous dans une cloison, ou sur le corps d'un instrument à vent), et à remplir l'espace derrière cet obstacle (fig. 32).

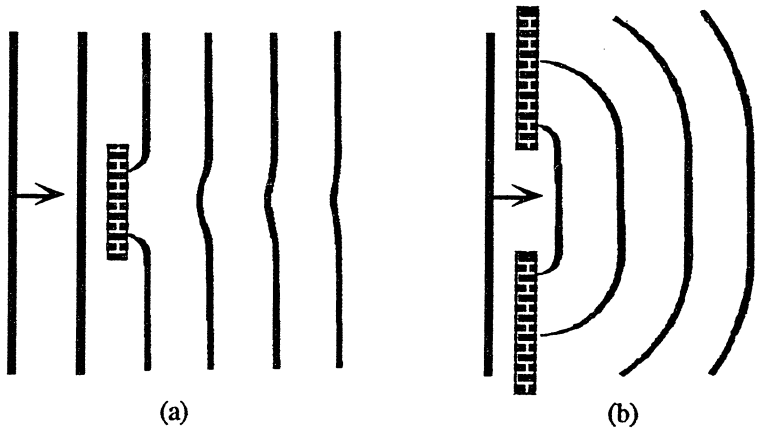


Fig. 32 : la diffraction

4.1. Surfaces réfléchissantes

Contrairement aux rayons lumineux, les ondes sonores ne sont pas totalement arrêtées par les obstacles, et peuvent les contourner. Leur comportement est fonction de la longueur d'onde : une paroi carrée de 1 m de côté est facilement franchie, sans perte d'énergie, par un son de 100 Hz dont la longueur d'onde mesure 3,4 m. C'est pourquoi il est possible d'entendre quelqu'un derrière un mur sans le voir. A droite de l'obstacle (fig. 32 a), on peut apprécier la « zone d'ombre », c'est-à-dire la trace que celui-ci provoque sur le passage de l'onde.

Il se produit au contraire une réflexion si les dimensions de l'obstacle sont grandes par rapport à la longueur d'onde : la paroi de 1 m renvoie un son de 10 000 Hz, dont la longueur d'onde ne mesure que 3,4

cm. Cela signifie-t-il qu'un tel son est dans ces conditions inaudible ? Non, car une petite partie de l'énergie de l'onde passe au ras du mur par diffraction, donnant naissance à une onde sphérique se propageant de l'autre côté dans toutes les directions (fig. 33).

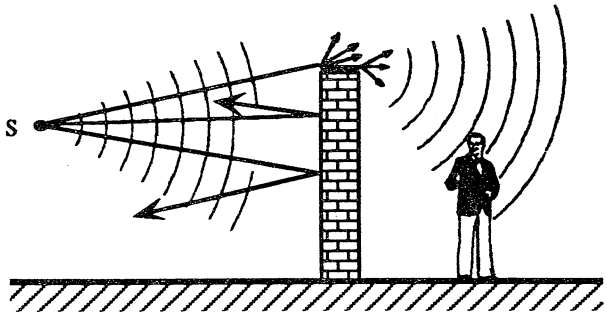


Fig. 33: diffraction sur un mur

Dans les situations réelles, le phénomène est complexe car les sons se composent de plusieurs fréquences, ce qui implique qu'une partie du spectre peut éventuellement franchir l'obstacle, qu'une autre est réfléchie et une autre encore est diffractée. Un obstacle ne masque pas complètement un son, mais modifie son timbre, spécialement par action sur ses harmoniques ou ses partiels aigus. Il faut tenir compte de ce phénomène dans certaines situations, comme en prise de son où, par exemple, un microphone doit être de petite taille afin de limiter les effets de diffraction pour les fréquences élevées.

4.2. Ouvertures

Lorsqu'une onde se présente face à un trou, l'énergie transmise est fonction là encore du rapport existant entre la surface de l'ouverture et la longueur de l'onde : plus l'ouverture est grande devant λ, plus grande est l'énergie transmise ; si au contraire l'ouverture est plus petite que λ, l'onde est diffractée et l'orifice se comporte comme une nouvelle source

rayonnant dans toutes les directions, donnant à l'onde une forme sphérique (fig. 32 b). Cette sphérification de son front explique que l'énergie d'une onde diffractée se dissipe plus vite que celle d'une onde plane.

5. La diffusion

Une surface réfléchissante n'est pas toujours plane, et peut se présenter sous forme de plans diversement inclinés. Dans ce cas, le comportement des ondes est encore une fois fonction du rapport entre la taille des obstacles et leur longueur λ.

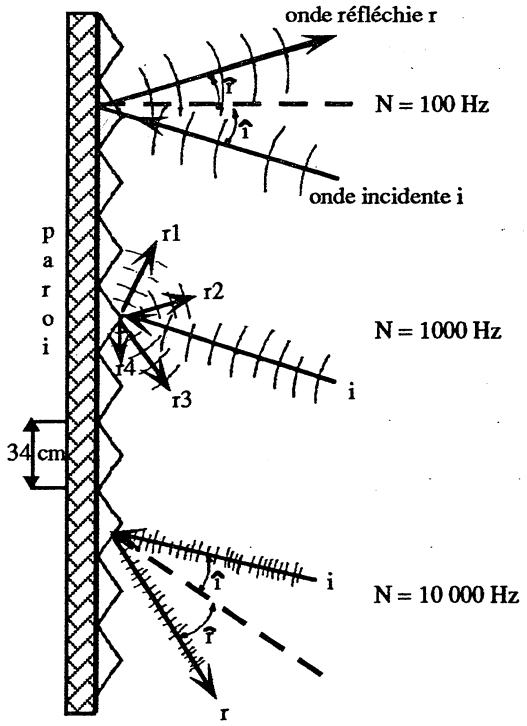


Fig. 34 : la diffusion

La paroi représentée sur la figure 34 est constituée de soufflets de 30 cm de long . Si un son de 100 Hz (donc de longueur 3,40 m) vient la frapper, il ignore purement et simplement les soufflets et se réfléchit sur

la paroi comme si elle était lisse. Si la fréquence du son est de 1000 Hz, la longueur d'onde est de 0,34 m, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que les soufflets : le son est alors « diffusé » par réflexions sur chacune des faces, en fonction de leur orientation. Quand la longueur de l'onde est nettement inférieure à la dimension des soufflets, comme c'est le cas pour 10 000 Hz avec 3,5 cm, une réflexion unique s'effectue sur l'une des faces, en fonction de l'orientation incidente. En résumé, un son n'est réellement diffusé que pour une longueur d'onde voisine de celle des surfaces orientées. Mais encore une fois, les sons réels sont complexes, donc formés de plusieurs longueurs d'onde dont les comportements ne sont pas identiques.

6. La réfraction. Impédance du milieu

La réfraction est le passage d'une onde d'un milieu à un autre en cours de propagation. Si ces milieux présentent des caractéristiques différentes, la direction de propagation peut s'en trouver modifiée.

Tout milieu est caractérisé par son impédance, c'est-à-dire par la plus ou moins grande facilité avec laquelle une onde se propage dans ce milieu. Cette impédance Z est égale au produit de la masse volumique ρ du milieu par la célérité dans ce milieu, soit :

$$Z = \rho c \qquad (28)$$

Ceci a pour conséquence quatre propriétés importantes :

a) plus l'impédance est grande, plus la célérité de l'onde est élevée ;

b) plus l'impédance est grande, plus l'onde s'amortit vite ;

c) l'amortissement est proportionnel à la fréquence : l'amplitude des aigus diminue plus vite que celle des graves ;

d) quand les impédances de deux milieux traversés sont égales, il y a résonance[1] entre ces milieux.

Dans ce dernier cas, la transmission d'énergie est maximum ; au contraire, lorsque les valeurs d'impédance sont éloignées, l'énergie se communique mal : par exemple, de l'air à l'eau (deux milieux aux impédances très différentes), 99,9% de l'onde est réfléchi, et seulement 0,1% est réfracté, et pénètre dans le liquide. Il est faut tenir compte de la réfraction et de l'impédance des matériaux utilisés dans le traitement acoustique des salles, et particulièrement pour leur insonorisation.

La propriété c explique les modifications du timbres des sons par amortissement des aigus lorsqu'ils sont entendus à grande distance (cf. p. 71).

Le milieu lui-même peut présenter des modifications de ses caractéristiques. Par exemple, tout au long d'une belle journée d'été, le soleil chauffe le sol, qui à son tour chauffe l'air par effet de convection, mais naturellement de moins en moins avec l'élévation. C'est ce que l'on appelle un gradient de température négatif. La célérité du son étant proportionnelle à la température, celle-ci est plus rapide près du sol qu'en altitude : la direction de propagation s'en trouve modifiée et le front d'onde basculé vers le haut ; un récepteur éloigné de la source la captera avec un sensible affaiblissement d'intensité. Mais la nuit, le phénomène s'inverse, car le sol restitue toute la chaleur reçue pendant le jour sans en recevoir lui-même de nouvelle ; il se produit alors un gradient positif ou « inversion de température » dans les couches d'air successives, entraînant une courbure vers le sol des ondes sonores (fig. 35). Les conditions de réception d'un signal lointain sont améliorées. C'est la raison principale pour laquelle, en Afrique, on transmet de préférence à l'aube plutôt qu'au crépuscule les messages tambourinés d'un village à

[1] Cf. chap. V.

l'autre. Le même phénomène se produit également en mer, où la surface de l'eau est souvent plus froide que l'air environnant, favorisant ainsi l'audition à grande distance.

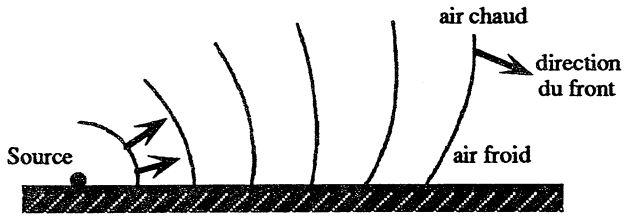


Fig. 35 : réfraction dans l'air

7. Conclusion : problématique de l'acoustique architecturale

La complexité des paramètres déterminant la qualité d'une salle est considérable. D'abord, parce que tous les phénomènes que nous venons d'étudier se produisent simultanément : une onde sonore est tout à la fois réfléchie, diffusée, absorbée, réfractée et diffractée.

D'autre part, beaucoup d'autres facteurs interviennent, souvent difficiles à prévoir, et a fortiori à quantifier : par exemple, selon que le public est plus ou moins nombreux, le taux d'absorption diffère, ce qui entraîne une variation du temps de réverbération. On estime qu'un spectateur représente 0,5 m^2 de surface absorbante, mais ce n'est qu'une approximation[1].

Le calcul d'une salle, c'est-à-dire l'évaluation par avance de ses qualités acoustiques, pose encore bien des problèmes. Certes, la théorie a énormément progressé depuis les premiers travaux de Sabine au début du siècle. Les principales méthodes font appel à la géométrie pour prévoir le trajet des ondes, mais beaucoup d'autres paramètres et d'éléments

[1] Sabine estimait à 0,49 le coefficient d'absorption moyen d'un homme, à 0,54 celui d'une femme, puis justifiait cet écart non négligeable par la différence de toilette et de coiffure (!)

constitutifs sont maintenant pris en compte ; les formules deviennent de plus en plus précises et l'ordinateur, muni de puissants logiciels spécialement conçu[1], est largement mis à contribution. Cependant, malgré cette mobilisation scientifique et technologique, le résultat concret, c'est-à-dire la bonne qualité d'une salle, n'est pas garanti à coup sûr, et certains échecs spectaculaires récents, ou simplement quelques déceptions, peuvent en témoigner.

C'est pourquoi, à côté des méthodes géométriques, qui tentent de prévoir le trajet des ondes par le calcul angulaire (au moins pour les premières réflexions), il existe d'autres démarches, expérimentales et donc différentes dans leur approche du problème : par exemple par la construction de maquettes en modèle réduit dans lesquelles on injecte des sons dont les longueurs d'onde sont à l'échelle (si la maquette est au 1/20ème, un son de 100 Hz devient 2000 Hz) ; ils sont ensuite captés par des micros judicieusement placés, enregistrés et analysés.

Mais la principale ressource en cas de problème reste l'amélioration par intervention sur une acoustique déjà existante. Si les défauts sont correctement analysés, ils peuvent être le plus souvent éliminés au prix de modifications parfois drastiques de la configuration architecturale d'origine.

Un exemple significatif en est fourni par la fameuse affaire du *Philharmonic Hall Lincoln Center* de New York. Ce lieu, conçu par un éminent acousticien[2], fut inauguré le 2 septembre 1962 : ce fut une catastrophe. La salle était jugée trop « sèche », le temps de réverbération trop court, les basses fréquences ne ressortaient pas, certaines places

---

1 Cf. M.R. Schroeder, "Computer Models for Concert Hall Acoustics", *American Journal of Physics,* 41/4, 1973.

2 Leo Beranek ; cf. la préface de son livre *Music, Acoustics and Architecture,* New York, 1962, où il affirmait, deux mois avant l'inauguration, que la perfection du confort acoustique de sa salle ne devait rien à « Madame la Chance », qui avait dû céder la place à de solides conceptions scientifiques.

étaient victimes d'échos intempestifs, et de surcroît les musiciens du New York Philharmonic Orchestra se plaignaient de ne pas s'entendre les uns les autres. Le plus surprenant était que toutes sortes de tests avaient été réalisés une semaine avant, en présence des concepteurs, d'experts acousticiens et des musiciens de l'orchestre ; la salle étant vide, on avait poussé les précautions jusqu'à simuler un public en disposant sur les sièges de petits tapis en fibre de verre : tout avait été jugé parfaitement satisfaisant. Pour ajouter encore au désarroi des spécialistes, les mesures effectuées après coup ne montrèrent rien d'anormal, y compris le temps de réverbération qui n'était pas trop court, mais bel et bien conforme à la norme pour de telles salles de concert. Il ne fallut pas moins de quatorze années de recherches, et une nouvelle équipe de spécialistes[1] pour que la salle fût estimée enfin satisfaisante. On changea jusqu'à son nom, lequel est désormais *Avery Fisher Hall*.

En outre, les possibilités d'aménagement dépendent essentiellement du type de lieu, et il est toujours plus facile de transformer une salle de cinéma qu'une abbaye romane.

Les critères de qualité d'une salle sont aujourd'hui nombreux comme en témoigne la multitude des paramètres, très précisément définis, pris en compte dans les évaluations : homogénéité, clarté, densité spectrale, traînage, plénitude, inertie, pouvoir séparateur, pour n'en citer que quelques-uns. La salle idéale n'existe sans doute pas dans l'absolu, et le confort acoustique dépend fondamentalement de l'adéquation entre un lieu et son utilisation.

Comme il n'est pas possible — pour d'évidentes raisons — de multiplier les lieux d'écoute, une solution moderne consiste à construire des salles polyvalentes à acoustique variable en fonction des besoins (*Espace de projection* de l'IRCAM à Paris, *Palais des Congrès* de

---

[1] Dirigée par Cyril Harris, professeur à l'Université de Columbia.

Belgrade...) : utilisation de panneaux coulissants, de plafonds montants ou descendants pour modifier le volume de la salle, mais surtout de parois constituées de prismes dont chaque face possède un coefficient d'absorption différent, le tout géré par un ordinateur permettant de mémoriser et de retrouver immédiatement une configuration acoustique déterminée. Un autre procédé consiste à capter les ondes par des microphones suspendus au plafond et à les rediffuser par des haut-parleurs situés sur les murs. Ce système, appelé M.C.R. (*Multi Channel Reverberation*) est très délicat à mettre en place mais peut donner de bons résultats (*Palais des Festivals* à Cannes, auditorium de la SWF à Baden-Baden).

* *
*

Comme toujours en acoustique musicale, dès que l'on se place dans des conditions réelles, concrètes, les phénomènes physiques donnent toute la mesure de leur complexité. Cela est d'autant plus sensible que le « bon résultat » est jugé par des appareils de mesure, mais aussi par des oreilles, des cerveaux, des systèmes nerveux humains, dont les critères d'appréciation sont moins connus, et loin d'être toujours identiques. La plupart des spécialistes en sont à l'heure actuelle parfaitement conscients, et orientent leurs recherches dans le sens d'une prise en compte toujours plus poussée et affinée de la subjectivité.

CHAPITRE V

LES CORPS VIBRANTS

Après avoir étudié les bases physiques et mécaniques qui sous-tendent le fonctionnement des instruments de musique, nous pouvons maintenant aborder le comportement vibratoire réel des principaux facteurs. Tout instrument suppose un système vibrant, dont les principes acoustiques sont relativement peu nombreux : cordes tendues, colonnes d'air contenues dans des tuyaux, membranes attachées dans des cadres, corps solides le plus souvent percutés, constituent l'essentiel des familles instrumentales. Nous n'aborderons ici que les cordes et les tuyaux.

1. Les cordes

1.1. Forme de la vibration

Une corde tendue entre deux points fixes vibre en décrivant un fuseau (fig. 36). La vision d'une telle forme est une simplification dûe à la persistance rétinienne, car le mouvement réel de la corde est en réalité beaucoup plus complexe.

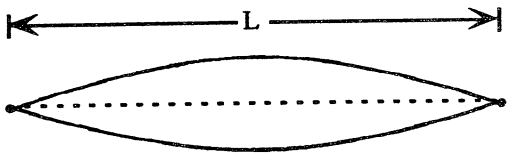


Fig. 36 : vibration d'une corde en fuseau

Nous avons déjà observé (fig. 21) une vibration transversale dans un ressort ; dans cet exemple, le ressort possède cinq masses, et peut être qualifié pour cette raison de « système à 5 degrés de liberté » ; par comparaison, l'oscillateur harmonique (fig. 14) n'en possédait qu'un seul. Une corde est assimilée à un système à n degrés de liberté, l'ensemble de ses n points matériels étant n masses reliées entre elles par des raideurs k. Les courbes délimitant les contours du fuseau de la corde vibrante sont en réalité formées d'un très grand nombre de segments de longueur extrêmement petite (fig. 37) :

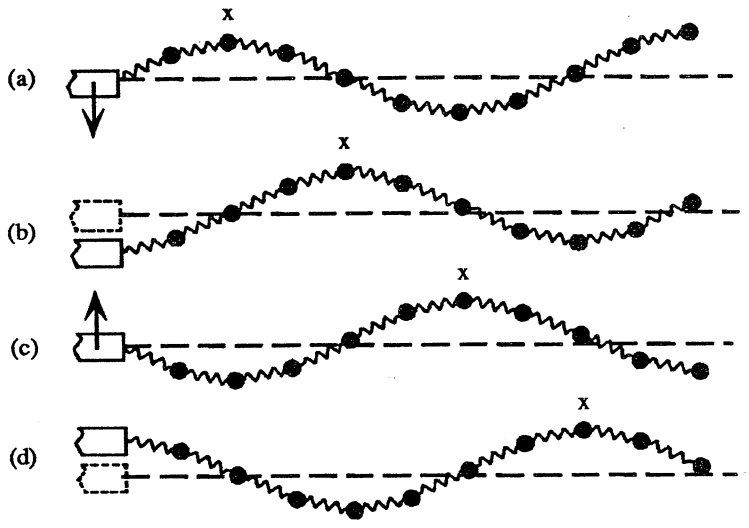


Fig. 37 : décomposition d'une vibration transversale

Sur une corde réelle, les masses sont beaucoup rapprochées que sur le schéma ci-dessus. Au point d'élongation maximum x correspond à la

fois un maximum de pression (appelé ventre) et un minimum de vitesse (appelé nœud). Un ventre de pression est toujours le siège d'un nœud de vitesse, et inversement ; les nœuds et ventre de vitesse (ou de pression) alternent régulièrement tout au long du médium en vibration ; quand ces termes sont utilisés sans autre précisions, ils s'appliquent à la vitesse.

Supposons maintenant la corde fixée à ses deux extrémités. Après excitation, une onde la parcourt sur toute sa longueur, puis parvient à une extrémité fixe ; le mouvement ne pouvant donc plus se transmettre au-delà, l'onde se réfléchit et repart en sens inverse ; elle décrit alors la seconde moitié du fuseau, puisque l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Un fuseau est donc une oscillation complète de la corde autour de sa position d'équilibre, correspondant à une période entière du mouvement, soit encore à un aller et retour de l'onde le long de la corde (fig. 38 a).

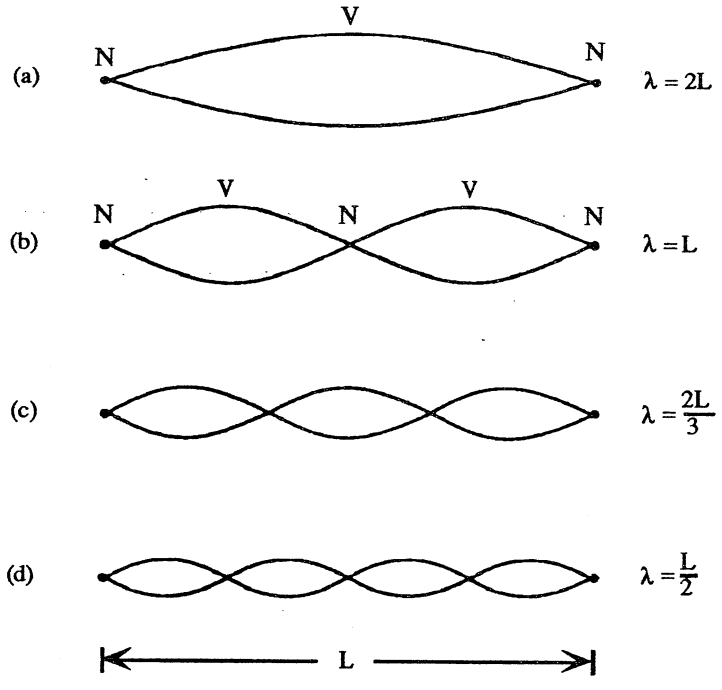


Fig. 38 : modes vibratoires d'une corde

En d'autre termes, la longueur d'onde λ est égale à deux fois la longueur L de la corde :

$$\lambda = 2L \tag{29}$$

1.2. Fréquence d'une corde

Étant immobilisée aux deux bouts, la corde vibrante comporte un nœud de vitesse à chaque extrémité, et un ventre en son milieu. Sa fréquence fondamentale N_f peut se calculer aisément, et est égale au quotient c/λ (équ. 18), qui prend ici la forme $c/2L$ (29) ;

$$N_f = \frac{c}{2L} \tag{30}$$

Comme nous savons (équ. 13) que la célérité d'un onde dans une corde est égale à $\sqrt{\tau/\rho}$, nous en déduisons la formule classique (dite de Taylor) :

$$N_f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \tag{31}$$

Ce mode vibratoire, appelé mode d'ordre 1, engendre donc la fréquence fondamentale de la corde, c'est-à-dire celle que délivre la corde lorsqu'on l'excite normalement. Si nous excitons à nouveau cette dernière en maintenant légèrement son milieu immobile, nous créons un nœud de vitesse en ce point, et obtenons deux fuseaux égaux (fig. 38 b). La longueur d'onde a diminué de moitié, de sorte que $\lambda = L$, et la fréquence N_2 devient :

$$N_2 = \frac{c}{L} = 2\frac{c}{2L} = 2N_f \tag{32}$$

C'est le 2ème mode vibratoire de la corde, ou partiel 2, situé à l'octave supérieure du mode 1. Les modes suivants s'obtiennent de la même façon : par création d'un nœud à son tiers, la corde se divise en trois

fuseaux (fig. 38 c), λ est égale à 2/3L, et la fréquence est celle du mode 3, c'est-à-dire du 3ème partiel ($N_3 = 3N_f$).

Le nombre de modes, égal au nombre de degrés de liberté (cf. supra), est théoriquement infini. En pratique, la vibration d'une corde correctement tendue se décompose en quelques dizaines de modes au maximum. Chacun d'entre eux représente une division de la corde en un nombre entier de parties, et son numéro d'ordre est égal au nombre de ventres de vitesse s'établissant le long de la corde. La fréquence N_n d'un mode n est donc égale à :

$$N_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \qquad (33)$$

Quand la corde est excitée, elle vibre normalement selon tous ses modes simultanément. C'est en cela que sa vibration est complexe. Mais par immobilisation partielle, comme nous l'avons vu précédemment, un mode particulier peut être privilégié : c'est ce que l'on appelle les harmoniques effleurés, en réalité l'émergence d'un partiel sélectionné.

Lorsque une corde vibre de cette façon, selon un mode donné, elle est le siège d'un certain nombre de nœuds et de ventres situés toujours à la même place, de sorte que certains de ses points sont toujours en mouvement (les ventres) et d'autres toujours immobiles (les nœuds). Ce phénomène est connu sous le nom d'onde stationnaire ; nous le retrouverons plus loin avec l'étude des tuyaux.

1.3. Modes vibratoires

Nous n'avons pris en considération jusqu'ici que la vibration transversale de la corde. C'est de toute façon la principale, puisqu'elle détermine la fréquence entendue, mais une corde vibre de plusieurs façons simultanément.

Du fait qu'elle décrit un fuseau, c'est-à-dire une courbe, à partir de sa position de repos, rectiligne, la corde subit des allongements périodiques, constituant une véritable vibration longitudinale, de fréquence plus élevée que la vibration transversale. On ne l'entend pas isolément (sauf en frottant un archet dans le sens de sa longueur), mais elle colore le spectre principal et intervient comme composante du timbre.

Il existe encore un troisième type vibratoire, plus ou moins présent selon le mode d'excitation : une corde tirée et relâchée ne décrit pas un fuseau uniquement dans le plan à deux dimensions, mais également dans un espace à trois dimensions. Cela revient à dire que la corde tourne périodiquement autour de son axe, un peu à la manière d'une corde à sauter : c'est ce que l'on nomme la vibration de torsion. Comme la vibration longitudinale, elle n'a pas d'existence autonome dans le jeu instrumental, mais elle modifie le spectre principal.

2. Les tuyaux

La vibration des colonnes d'air contenues dans les tuyaux ne diffère pas beaucoup de celle des cordes, et la plupart des principes importants dégagés plus haut peuvent s'appliquer ici.

2.1. Tuyaux fermés aux deux extrémités

Imaginons un tuyau fermé aux deux extrémités dans lequel une impulsion se propage sous la forme d'une onde progressive. L'énergie se communique de molécules en molécules pour parvenir à une extrémité. Ne pouvant transmettre plus loin l'énergie reçue, la dernière molécule la redonne à sa voisine et l'onde repart en sens inverse ; il s'est donc produit une réflexion sur l'extrémité fermée, le même phénomène recommençant du côté opposé. Nous obtenons ainsi un nœud de vitesse à chaque

bout, puisque le mouvement des molécules d'air est impossible et la pression maximum, et un ventre entre les deux nœuds, c'est-à-dire au milieu du tuyau. Cette forme est tout à fait identique à celle du mode 1 des cordes vibrantes, et nous retrouvons par conséquent la même relation pour la fréquence (équ. 30), à savoir :

$$N_f = \frac{c}{2L} \qquad (30)$$

Par rapport à la corde, les calculs sont simplifiés pour la célérité, puisque c'est celle d'une onde dans l'air.

De tels dispositifs ne sont guère attestés en musique, où l'on utilise plutôt des tuyaux ouverts à une ou deux extrémités.

2.2. Tuyaux ouverts aux deux extrémités

Dans ce dernier cas, il facile de montrer que la compression se déplaçant dans le tuyau ne rencontre pas d'obstacle au bout et qu'il se forme un nœud pression, soit un ventre de vitesse. En d'autre termes, une compression parcourt le tuyau sur une longueur et se transforme en décompression repartant en sens inverse jusqu'à l'extrémité opposée ; parvenue à ce point, la décompression se rechange en compression, et un nouveau cycle recommence. Un cycle complet correspond toujours à deux longueurs de tuyau, c'est-à-dire à un aller et un retour. La fréquence fondamentale se calcule donc au moyen de l'équation 30, et la seule différence avec le cas du tuyau fermé aux deux bouts — et par conséquent avec la corde — est la présence de deux ventres de vitesse aux extrémités au lieu de deux nœuds (fig. 39 a). On notera également que l'espace compris entre deux ventres (ou deux nœuds) équivaut à une demi-longueur d'onde.

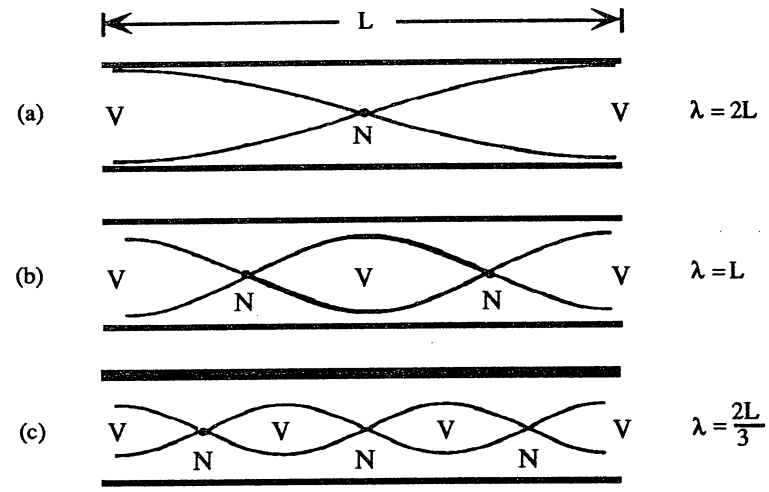


Fig. 39 : modes vibratoires d'un tuyau ouvert

Dans les tuyaux, plusieurs modes vibratoires se superposent, selon les modalités étudiées plus haut. En forçant le souffle, par exemple, la colonne d'air se « scinde » en deux (mode 2), les ventres de vitesse se placent aux extrémités et au milieu du tuyau (fig. 39 b) ; deux ventres consécutifs devant nécessairement être séparés par un nœud, ceux-ci s'intercalent, et leur nombre est toujours égal à n ventres moins un.

Tous les instruments à biseau, les anches doubles et la plupart des cuivres fonctionnent comme des tuyaux ouverts.

2.3. Tuyaux fermés à une extrémité

Le fonctionnement des tuyaux fermés[1] est plus complexe, du fait de l'asymétrie de leurs extrémités (fig. 40) :

[1] Désormais, « tuyau ouvert » signifiera ouvert aux deux bouts, et « tuyau fermé » fermé à une seule extrémité.

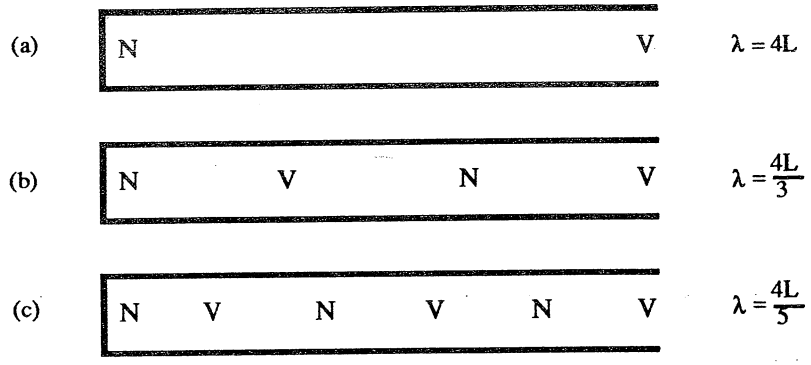


Fig. 40 : modes vibratoires d'un tuyau fermé à un bout

Le cycle d'un tel tuyau, appelé parfois « bourdon », se décompose de la façon suivante : une compression parcourt la longueur une première fois, se réfléchit sans changement de signe contre l'extrémité fermée, repart en sens inverse jusqu'à l'extrémité ouverte ; la compression « sort », laissant place à une décompression repartant en sens inverse jusqu'à l'extrémité fermée, sur laquelle elle se réfléchit, et gagne enfin l'extrémité ouverte où elle se change en compression, après quoi le cycle recommence. L'onde a donc parcouru quatre fois la longueur du tuyau pour accomplir un seul cycle. Nous en déduisons aisément la fréquence du mode 1, ou fondamental (fig. 40 a) :

$$N_f = \frac{c}{4L} \qquad (34)$$

L'alternance obligée des nœuds et des ventres entraîne pour les modes suivants (2 et 3) les successions montrées sur la figure 40 (b et c). Puisque la distance comprise entre deux nœuds de vitesse représente λ/2, la longueur d'onde du mode 2 vaut 4/3L, et sa fréquence :

$$N_2 = \frac{c}{4/3L} = 3\frac{c}{4L} = 3N_f \qquad (35)$$

Cela signifie que le 2ème mode d'un tuyau fermé sonne à la 12ème supérieure (octave + quinte) du fondamental, c'est-à-dire à la hauteur de l'harmonique 3. Le même raisonnement montre que le mode 3 correspond à l'harmonique 5, le mode 4 à l'harmonique 7, et ainsi de suite. Les modes vibratoires d'un tuyau fermé à une extrémité produisent donc la série des partiels de rangs impairs.

3. La résonance

3.1. La fréquence propre

Tout corps susceptible de vibrer possède une fréquence propre. Par exemple, un diapason, une corde de violon, un tuyau d'orgue, une fois excités, émettent un son d'une certaine hauteur, précisément leur fréquence propre. Cette fréquence, pour les cordes et les tuyaux, est celle de leurs différents modes, comme nous venons de le voir. Mais la mise en vibration ne produit pas nécessairement une hauteur précise, ponctuelle, cela peut être une bande de fréquence plus ou moins large, comme dans le cas, par exemple, d'une caisse de résonance d'instrument à cordes. Nous appellerons résonateur le corps capable de vibrer (ex. corde de piano ou de violon), et excitateur le dispositif communiquant l'énergie vibratoire au résonateur (ex. marteau du piano, archet du violon).

3.1.1. Vibrations libres

Il existe différentes façons de faire vibrer un résonateur. L'excitateur peut transmettre son énergie sous la forme :

a) d'un ébranlement très bref, par exemple un choc, un pincement, une impulsion ;

b) d'une force constante non oscillante, par exemple le souffle sur un biseau, l'archet sur la corde.

Dans ces deux cas, le corps vibrant, laissé à lui-même, délivre sa fréquence propre : c'est le régime des vibrations libres (ou encore naturelles). L'excitateur n'intervient pas dans la détermination de la fréquence, il communique une certaine quantité d'énergie potentielle que le résonateur dissipe sous forme d'énergie cinétique, selon son mode vibratoire propre.

3.1.2. Vibrations forcées ; la résonance

Le résonateur peut, au contraire du cas précédent, être soumis à une force oscillante, c'est-à-dire variant périodiquement en fonction du temps : le corps est alors entraîné à vibrer à la fréquence de la force qui l'ébranle, il est assujetti à un régime de vibrations forcées. Une corde fixée à une caisse de résonance est pincée : l'excitateur est le doigt, il applique une force non oscillante ; la corde vibre librement et produit une hauteur précise qui dépend de ses propres paramètres, mais pas du doigt ou de la façon de pincer ; elle transmet l'énergie reçue et devient à son tour un excitateur, mais cette fois de nature oscillante, de sorte que la caisse de résonance vibre en régime forcé et se voit imposer la fréquence de la corde.

Si la fréquence de la force oscillante est voisine ou a fortiori égale à la fréquence propre du corps sur lequel elle s'applique, l'entraînement est aisé, les amplitudes s'additionnent à chaque cycle, et le mouvement vibratoire résultant peut atteindre rapidement une valeur considérable : c'est le phénomène de résonance. Un piano est capable de faire vibrer un objet proche de lui si l'une de ses notes correspond la fréquence propre de cet objet ; de même, un camion passant dans la rue pour les vitres d'un appartement, ou encore la houle entraînant un bateau dans un roulis important.

Le phénomène se produit de part et d'autre de la fréquence propre du résonateur, c'est-à-dire au-dessous et au-dessus, délimitant ainsi une bande de résonance ; l'effet d'entraînement est d'autant plus important que la fréquence de l'excitateur est proche du centre de la bande.

> L'exemple le plus spectaculaire de la puissance de la résonance est sans aucun doute la catastrophe du pont de la Basse-Chaîne. Le mardi 16 avril 1850, en route pour Marseille et l'Algérie, le régiment du 11ème Léger, au pas cadencé, franchissait la Maine à Angers par le pont de la Basse-Chaîne. Au passage de la troupe, le pont s'écroula, tuant sur-le-champ 116 hommes, alors que 108 autres devaient succomber plus tard à leurs blessures (détail funeste qui explique le nombre élevé de victimes : les soldats marchaient baïonnette au canon). Le pas régulier des hommes a joué en réalité le rôle d'un excitateur oscillant à basse fréquence mettant le pont en résonance : l'amplitude du mouvement est rapidement devenue telle que l'ouvrage ne put résister. Depuis, les manuels d'instruction militaire ordonnent de rompre la cadence en abordant un pont.

Le phénomène de résonance a été utilisé dans la conception de nombreux instruments de musique. Le vibraphone, par exemple, possède sous chacune de ses touches des tuyaux accordés à la même fréquence pour en renforcer et prolonger le son. Même dispositif pour le *gender* indonésien, en métal ; en Afrique centrale, de longues calebasses ou des cornes de buffle sont également placées sous les lames des xylophones.

Certains luths possèdent des cordes sympathiques qui ne sont pas touchées directement mais mises en vibrations uniquement par résonance, lors du jeu sur les cordes mélodiques : c'est le cas de la famille des archiluths européens, comme le théorbe ou le *chitarrone*, mais aussi des grands luths indiens, comme le *sitar* ou le *sarod*.

Le principe de la résonance est également utilisé en électronique (circuits oscillants, filtres), et particulièrement en radiodiffusion : la syntonisation, c'est-à-dire le réglage sur une station, au moyen du *tuner* ou décodeur, n'est autre qu'un accord de circuits par mise en résonance.

3.2. La loi de Küpfmüller

Les résonateurs possèdent un certain nombre de propriétés dont certaines sont importantes à connaître.

3.2.1. La sélectivité

La largeur de la bande de fréquence pour laquelle un corps est susceptible d'entrer en résonance détermine sa sélectivité : si un résonateur délivre une fréquence propre précise, unique pour un mode donné, comme les cordes vibrantes, il est très sélectif ; si au contraire il produit une large bande de bruit, comme une caisse de résonance de violoncelle, il est très peu sélectif.

2.2. L'amortissement

Nous connaissons déjà cette propriété des mouvements vibratoires, mais ici ce facteur est lié à la sélectivité par un théorème, appelé **loi de Küpfmüller** dont voici l'énoncé : *dans un résonateur, l'amortissement est inversement proportionnel à la sélectivité.*

Une expérience simple permet de vérifier cette loi. Si l'on émet la fréquence 440 Hz devant un diapason, il entre spontanément en vibration, et son mouvement subsiste un certain temps après arrêt de l'excitation. En revanche, il ne réagit pratiquement pas à d'autres fréquences, même approchées : il est très sélectif et peu amorti. Maintenant, plongeons-le dans l'eau et observons ses branches avec un microscope : il répond non seulement à la fréquence 440 Hz, mais également à des valeurs voisines. Toutefois le mouvement des branches s'arrête presque en même temps que la stimulation : le diapason est devenu moins sélectif, mais plus amorti.

2.3. Applications

De nombreux dispositifs, principalement en mécanique et en électronique, sont assujettis aux propriétés décrites par la loi de Küpfmüller.

Les cordes mélodiques des archiluths, comme nous venons de le voir, excitent par résonance les cordes sympathiques qui sont très sélectives, donc peu amorties : elles sonnent encore après interruption de la note principale ; l'excitation se transmet aussi à la caisse de l'instrument, qui réagit différemment, car elle est beaucoup moins sélective et par là nettement plus amortie.

Un tambour est généralement amorti : en lui adjoignant un « timbre », c'est-à-dire une corde tendue qui vibre pour certaines fréquences présentes dans le spectre de la membrane, le son en est prolongé, et perd en amortissement ce qu'il gagne en sélectivité (par exemple la caisse claire).

3.3. Formants et zones formantiques

3.3.1. Genèse

Jusqu'ici, nous avons considéré la force oscillante de l'excitateur comme une fréquence unique, soit parce qu'elle était sinusoïdale, soit parce que le fondamental d'un mouvement complexe a été seul pris en compte. Mais dans le cas précisément où l'excitateur est un spectre harmonique, tous les composants sont susceptibles d'attaquer un résonateur, de le faire vibrer, et d'autant mieux que la fréquence propre de celui-ci correspond à celle d'un des harmoniques du spectre.

Si un son périodique complexe de 100 Hz comprenant les six premiers harmoniques est envoyé dans un résonateur dont la fréquence propre est une bande comprise entre 300 et 400 Hz, celui-ci entrera en

résonance avec les harmoniques 3 et 4 du spectre. Mais le son résultant, rayonné à la sortie, est déformé par distorsion car l'intensité de ses composants 3 et 4 a été renforcée par le résonateur. Cette zone renforcée dans le spectre s'appelle un formant. Bien entendu, les possibilités pour un corps d'en faire vibrer un autre dépendent de l'énergie disponible dans le spectre excitateur, et la mise en résonance est d'autant plus aisée et rapide que les fréquences sont voisines les unes des autres.

Un formant est donc une zone d'intensité renforcée dans une région du spectre sonore. Ce renforcement d'intensité n'est pas une véritable amplification, comme le langage courant le laisse souvent entendre (sons « amplifiés » par une caisse de résonance) ; en effet, un résonateur ne peut apporter d'énergie extérieure au système, et se contente de la déplacer en en modifiant la répartion. Si une corde tendue entre deux paroi rigide est mise en vibration, le son entendu est très faible, car seule, les molécules d'air directement en contact avec elle reçoivent l'énergie vibratoire : celle-ci s'étale largement tout le long du spectre, sans formant. Mais si l'énergie vibratoire est transmise à une caisse de résonance, elle se focalise autour d'une fréquence propre, le spectre résultant est moins large, et cette concentration aboutit à un son plus intense (d'où l'impression d'amplification).

La plupart des sons musicaux présentent des formants dans leur composition spectrale. Les cordes vocales, par exemple, fournissent un spectre riche, mais homogène à la sortie du larynx ; ce spectre se déforme en traversant le pharynx et la bouche, et se « colore » des fréquences propres de ces cavités ; de fait, une voyelle, pour être perçue comme telle, doit obligatoirement comporter au moins deux formants, dont les différents emplacements dans le spectre déterminent la nature vocalique (a, i, u, etc.)

Les composants d'un spectre peuvent donc exciter le fondamental d'un résonateur. Le piano utilise ce principe avec sa pédale *forte*, qui relève les étouffoirs et permet à certaines cordes de vibrer par résonance. Par exemple, un *do2*, de fréquence 131 Hz, pourra faire sonner les cordes *do3* et *do4* par la présence de ses partiels 2 et 4, dont les fréquences sont très voisines de ces notes. De même, le partiel 3, de fréquence 392 Hz, excitera la corde *sol3*, etc. En réalité, on n'entend pas isolément ce halo sonore, mais toutes ces hauteurs fusionnent avec la note principale, y créent des formants, et redistribuent l'énergie au sein du spectre. On comprend dès lors pourquoi jouer avec ou sans pédale modifie la sonorité et change le timbre des notes.

3.3.2. Résonateurs de Helmholtz

Helmholtz fut le premier à étudier scientifiquement le phénomène de résonance. Il utilisait des sphères de verre de différentes tailles, emmanchées d'un petit col tubulaire. Avec un tel dispositif, l'air contenu dans le volume principal V se comporte comme un ressort et l'air présent dans le col comme une masse, ceci pour les ondes dont la longueur est grande devant les dimensions de V. Dans ces conditions, la fréquence propre d'un résonateur de Helmholtz se calcule aisément :

$$N_{propre} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV}} \qquad (36)$$

avec :
S la surface de l'ouverture du col (en m^2)
l la longueur du col (en m)
V le volume de la cavité (en m^3)

En présence d'un son traversant résonateur, il appliquait son oreille sur le col et entendait, renforcé par résonance, l'harmonique dont la

fréquence correspondait à celle de son résonateur. Il développa ce procédé, et construisit le véritable ancêtre du spectromètre, à savoir un dispositif comprenant 21 sphères de différents volumes, donc de différentes fréquences propres. Il étudia ainsi la composition de nombreux signaux complexes : en observant quels résonateurs réagissaient en présence de tel son, il parvenait à déterminer la fréquence de plusieurs de ses partiels ou de ses harmoniques.

Helmholtz utilisa le principe de la résonance pour expliquer le fonctionnement de l'oreille interne[1] ; il considéra tour à tour les piliers de Corti et les fibres transversales de la membrane basilaire comme des résonateurs auditifs capables d'analyser les sons complexes. Cette théorie est aujourd'hui abandonnée[2].

---

1 H. von Helmholtz, *op. cit.*
2 Cf. chapitre VIII.

CHAPITRE VI

INTRODUCTION A LA SPECTROGRAPHIE

1. Le sonagraphe

1.1. Insuffisance de l'oscillographie

Le mode de représentation des sons adopté jusqu'à présent était essentiellement l'oscillogramme, c'est-à-dire un diagramme comportant le temps en abscisse et l'amplitude en ordonnée. Le son y apparait sous la forme d'une courbe indiquant par exemple des variations de pression, de vitesse ou de déplacement, et cela demeure très pratique pour observer sa nature de mouvement ondulatoire.

L'oscillogramme présente toutefois un inconvénient majeur pour l'acoustique musicale, celui de fournir des tracés différents pour des résultats auditifs identiques : en effet, l'oreille n'est pas sensible aux décalages de phase pouvant se produire entre les composants d'un spectre (loi d'Ohm), alors que la forme de la courbe résultante varie en fonction du déphasage (fig. 41). En (a), les harmoniques 1 et 2, d'amplitude égale, sont en phase ; en (b), l'angle φ égale $\pi/2$ (décalage de phase d'un quart de période) ; en (c), $\varphi = \pi$ (décalage de phase d'une demi-période) : les

importantes variations subies par la courbe résultante n'auront aucune répercussion sur le plan auditif.

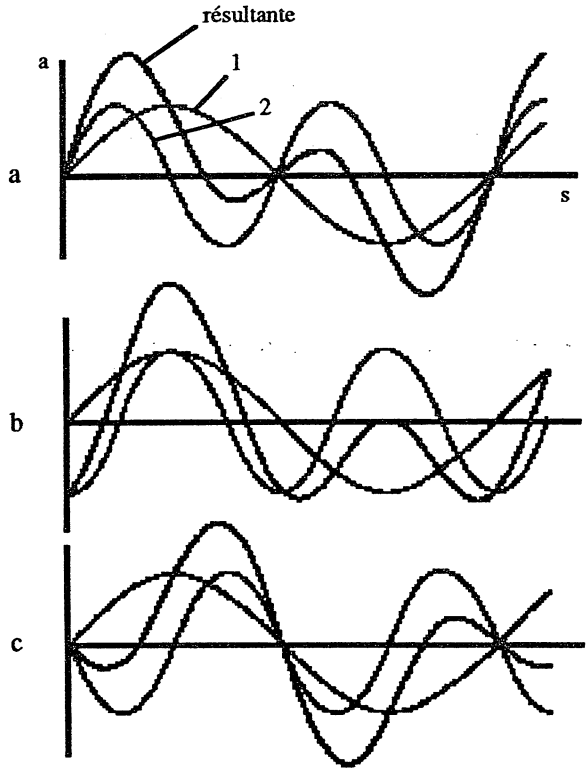


Fig. 41 : décalages de phase

Par ailleurs, une courbe résultante ne donne pas suffisamment de renseignements directement exploitables sur le contenu des sons, et il n'est pas envisageable en pratique, pour des raisons de complexité, de décomposer mathématiquement une telle courbe en séries de Fourier.

1.2. Le plan spectral

Il est donc essentiel d'utiliser un système d'analyse et de mesure qui soit d'une part adapté à la perception auditive, et qui d'autre part donne un accès visuel aisé aux paramètres sonores les plus importants. La spectrographie, c'est-à-dire en quelque sorte la « radiographie » des sons,

répond à cette exigence, et a permis ces dernières années des avancées considérables en acoustique musicale .

Il existe plusieurs types d'analyseurs de spectres, parmi lesquels le sonagraphe s'avère être un outil bien adapté à son objet. S'il est inutile d'en expliquer ici le fonctionnement, il est en revanche indispensable d'apprendre à lire et à interpréter les documents qu'il délivre, à savoir les sonagrammes.

2. Le sonagramme

2.1. Typologie élémentaire

Sur un sonagramme, le temps en secondes est en abscisse et la fréquence, exprimée en Hz ou KHz, en ordonnée : par conséquent la sinusoïde, matériau de construction élémentaire de tous les sons quels qu'ils soient, est représentée non plus par une courbe ondulante, mais par une simple ligne repérée en fréquence et en durée.

Attention à ne pas confondre les représentations oscillographiques et sonagraphiques, et à toujours vérifier les unités utilisées dans les diagrammes.

La figure 42 montre quatre sinusoïdes : en a, une fréquence de 2000 Hz tenue 0,5 s ; en b, un glissando ascendant sur un intervalle de 1 à 3 KHz, c'est-à-dire de douzième ; en c, une légère fluctuation de la fréquence autour de 1000 Hz indique un vibrato.

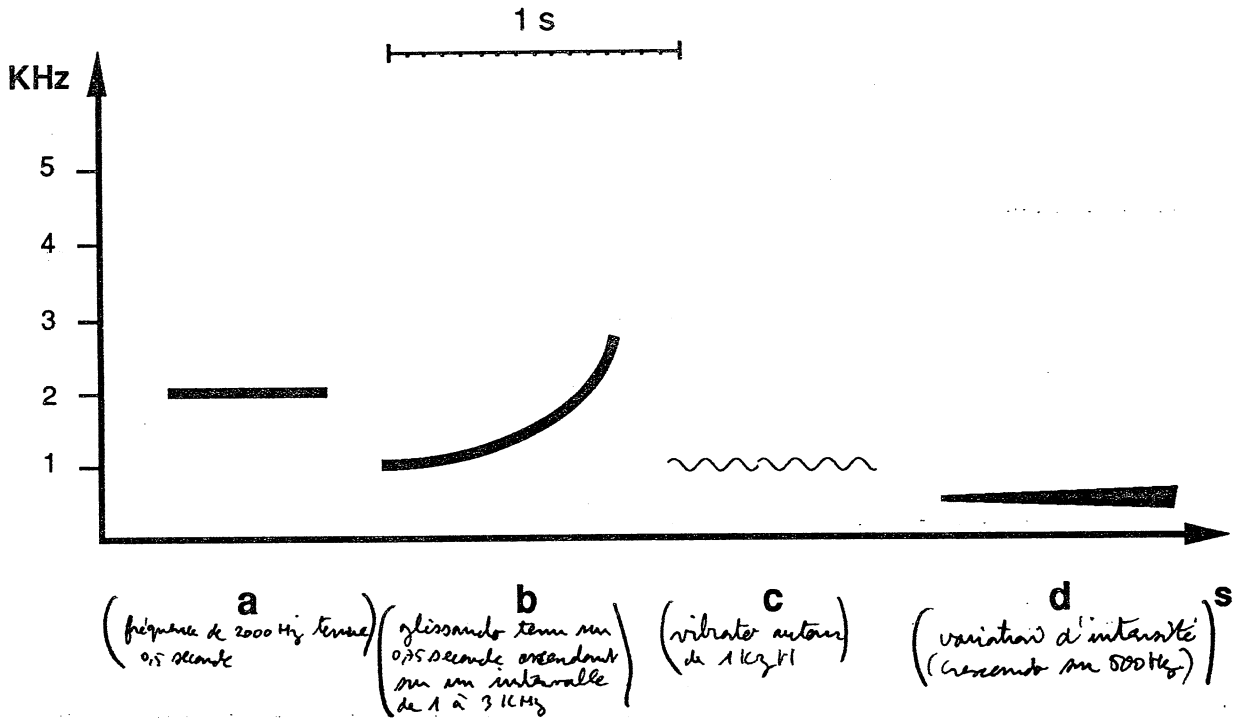


Fig. 42 : typologie sonagraphique élémentaire

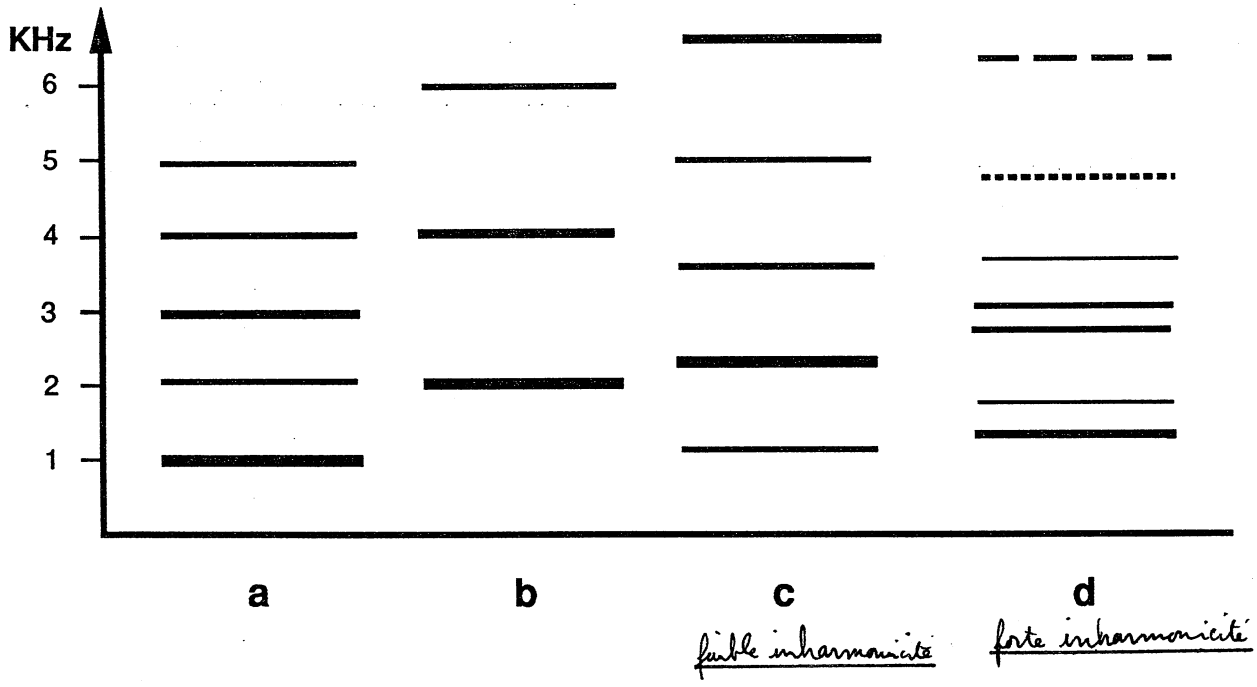


Fig. 43 : spectres de raies

Lorsqu'on utilise le plan spectral, les coordonnées sont la fréquence et le temps. L'intensité du signal est cependant représentée, par la plus ou moins grande densité de l'inscription. En d, le noircissement progressif ainsi que l'augmentation de l'épaisseur du trait représente une variation d'intensité, en forme de crescendo sur 500 Hz. Il n'est pas possible de mesurer avec précision cette variation, mais elle est appréciée par comparaison, ce qui est presque toujours suffisant. Par exemple, il est clair que le son a est plus intense que le son c. Dans les cas où la précision s'avérerait nécessaire, il est toutefois possible, avec le sonagraphe, d'obtenir une mesure rigoureuse de l'intensité, moyennant un changement d'unités, comme nous le verrons plus loin.

2.2. Signaux complexes

Les signaux sonores, dans leur totalité, sont des combinaisons d'éléments simples, de sinusoïdes, et cela apparaît clairement sur le sonagramme.

La fig. 43 a présente un son comportant cinq harmoniques et dont la fréquence est de 1 KHz puisque tous ses composants sont des multiples entiers de cette valeur. Le son b possède lui aussi des raies équidistantes, c'est donc également un son harmonique. Mais l'écart plus grand entre ses composants indique une hauteur plus aiguë : la différence de fréquence entre deux harmoniques de rangs voisins est de 2 KHz, ce qui place ce son à l'octave du précédent. Cela se voit également au fait que tous les harmoniques de b coincident avec les harmoniques pairs de a, impliquant entre leurs composants respectifs des rapports de 2/1, 4/2, 6/3, etc., c'est-à-dire d'une octave.

Les exemples c et d schématisent des sons inharmoniques. Les composants n'y sont plus équidistants parce que, par définition, les différences de fréquence entre les rangs voisins ne sont pas égales.

L'inharmonicité peut être faible (c) ou forte, et des battements peuvent même se produire entre deux partiels très proches (d). La sensation d'une hauteur précise est d'autant plus nette pour l'oreille que les partiels se rapprochent de la série harmonique (cf. chap. XIII).

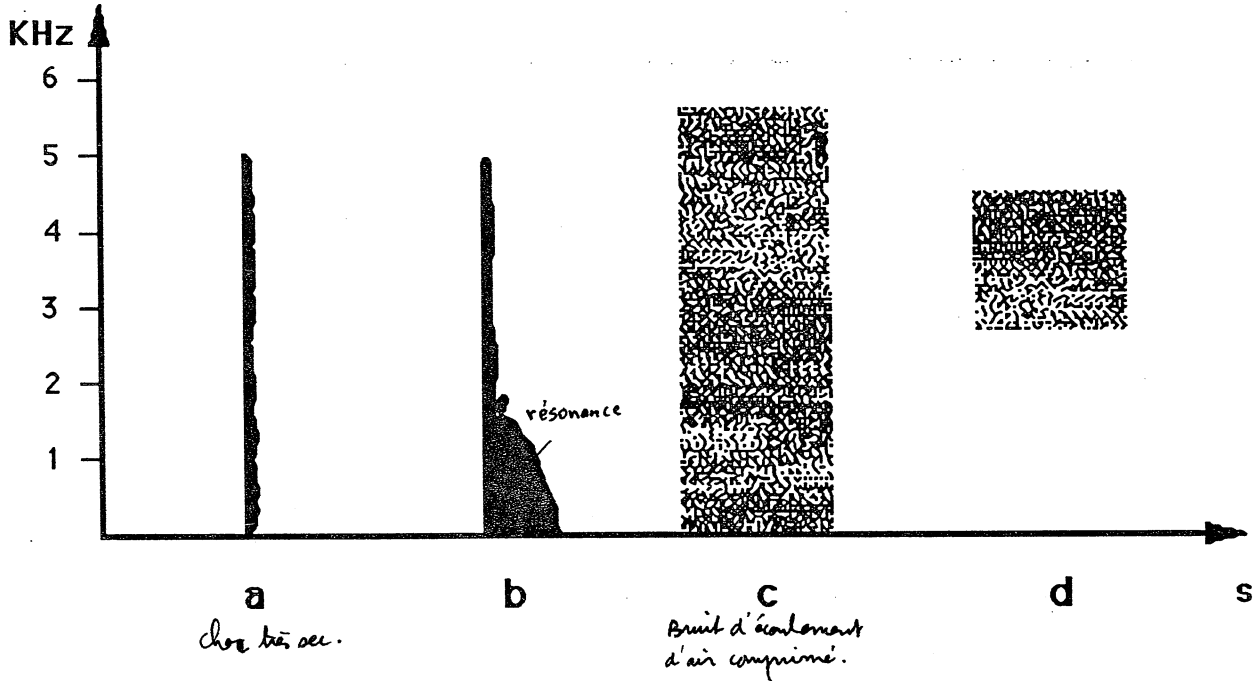


Fig. 44 : spectres de bruit

La figure 44 schématise différents types de bruits. L'exemple a comprend tout un spectre de fréquences contiguës pendant une durée extrêmement brève : c'est un choc très sec. Le son b dispose d'une attaque aussi raide, bien verticale, où tous les composants apparaissent en même temps, mais possède à l'inverse de a une résonance brève qui s'étend du grave jusque vers 1500 Hz.

Le son c diffère des précédents par sa durée, ce qui en change complètement la nature à l'audition : non plus un choc ou une explosion, mais un bruit d'écoulement d'air comprimé. Ce type de signal, qui contient aléatoirement une quasi infinité de fréquences, est appelé bruit

blanc. Une bande de bruit ne comprend qu'une partie, limitée en grave et en aigu, du spectre continu (d).

2.3. Interprétation du sonagramme

Les exemples que nous venons de voir sont simples parce que les sons y figurent isolés, hors de tout contexte, et dans une représentation schématique. Les sonagrammes suivants montrent, cette fois à l'aide de photographies, des sons musicaux réels et de la voix parlée.

La figure 45 présente une courte formule mélodique. Quels renseignements pouvons-nous en tirer ?

Remarquons d'abord que tous les spectres sont différents les uns des autres, même les notes identiques (cf. les deux sol_3) : il est clair qu'un musicien ne peut jamais rigoureusement se répéter. Toutefois, ces sons possèdent suffisamment d'éléments communs entre eux pour présenter « un air de famille », et indiquer qu'ils ont été joués par un seul et même instrument(iste).

Tous ces spectres sont riches en harmoniques et dépassent 8 KHz ; l'énergie est importante surtout dans le grave où l'on remarque une prédominance des harmoniques de rangs impairs (ré, sol, sib).

L'attaque des sons est caractéristique : apparition progressive des composants, et de plus en plus rapide du grave vers l'aigu, (à peu près en forme de courbe exponentielle) ; quant l'extinction, elle est plus lente pour les graves que pour les aigus.

Tous ces éléments, plus quelques autres, comme l'absence presque totale de souffle ou autres bruits d'attaque, désignent un instrument du type de la clarinette.

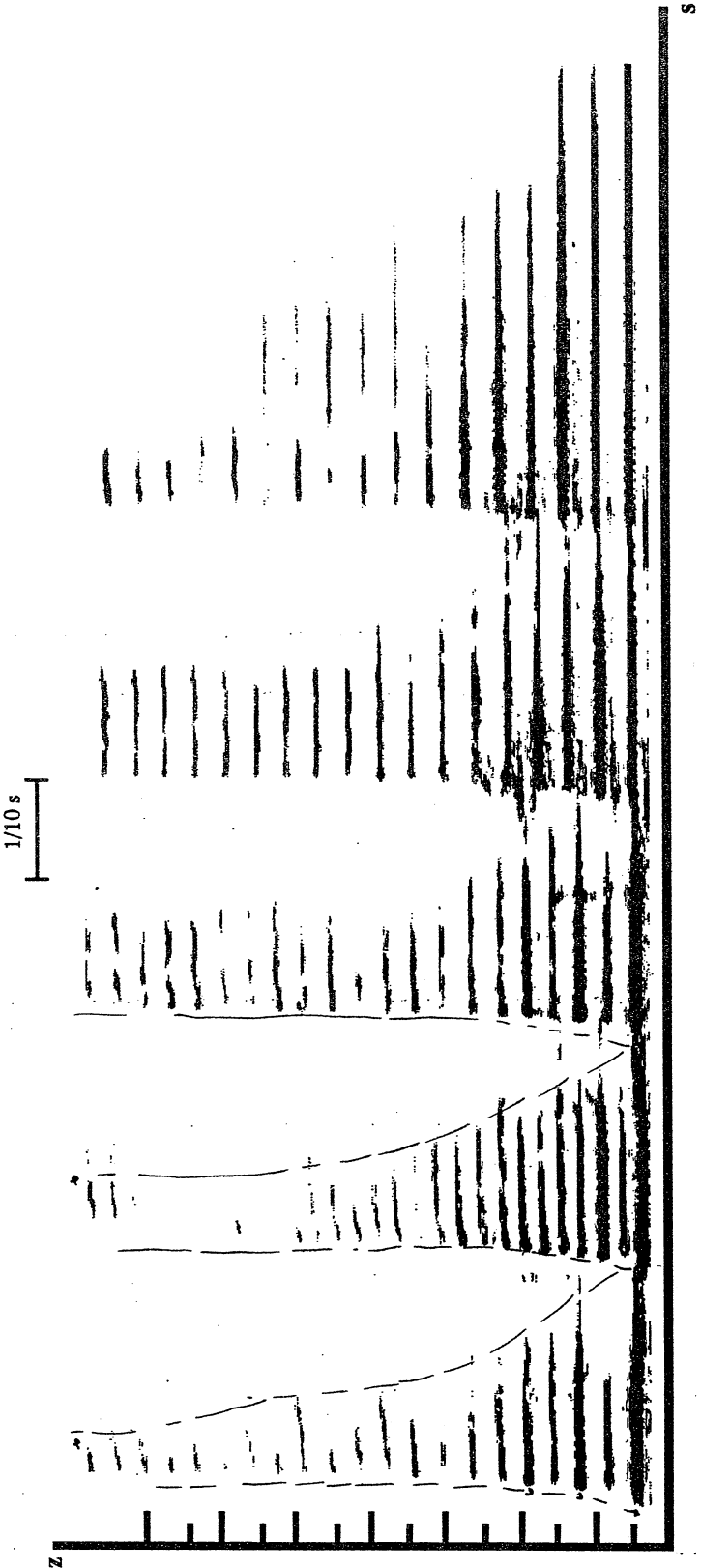


Fig. 45 : formule mélodique

Les informations d'ordre musical sont également nombreuses. Compte tenu de la précision de l'échelle de temps, une étude rythmique de l'interprétation serait possible : variations de tempo, *rubato*, régularité des traits, etc.

Les intervalles sont identifiables par les correspondances d'harmoniques : par exemple, le 3ème harmonique de sol coïncide avec le 4ème de ré, d'où le rapport 4/3, c'est-à-dire la quarte. La justesse peut être elle aussi analysée avec précision : ici, l'intervalle sol-la vaut 8/7, soit un peu plus qu'un ton tempéré, alors que le demi-ton la-si correspond à 18/17, ce qui est à peine plus petit : nous en déduisons que le mouvement mélodique a été soumis à la loi de l'attraction (cf. chap. XIV).

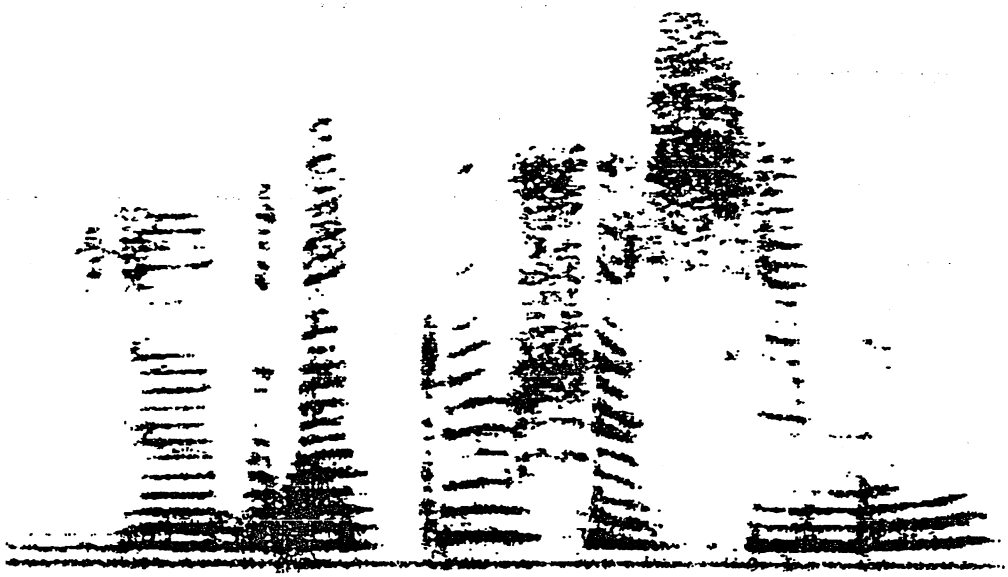


Fig. 46 : phrase parlée

La figure 46 présente le sonagramme d'une phrase parlée. Sa complexité sur le plan spectrographique est due à la variété des formes qui la composent et à la rapidité de leur évolution. L'analyse met en

évidence deux principaux types de signaux : des spectres harmoniques et des spectres de bruits de durées variables, correspondant respectivement aux voyelles et aux consonnes.

D'une façon générale, tous les sons du langage possèdent leur forme acoustique propre, et avec de l'entraînement il est possible de les reconnaître. Les consonnes occlusives sont des chocs ou claquements brefs, les sonores <d> étant plus riches en partiels aigus que les sourdes <t>. Les fricatives <ch, s> sont des bruits blancs de différents registres ; mais le <v> est un son entretenu, donc harmonique, comme la nasale <m>, émise à bouche fermée avant la coloration vocalique.

Les voyelles sont toujours des sons harmoniques, caractérisées par les emplacements de leurs formants (il en faut au moins deux pour créer une voyelle) Le <i> présente des formants très écartés (voyelle diffuse), le <a> au contraire très proches (voyelle compacte).

Mais dans les sons du langage, et cela se voit bien à la spectrographie, le plus important est le passage d'un phonème à un autre, c'est-à-dire l'articulation qui confère au langage sa véritable nature : ainsi le i de *viendra* et celui de *Simon* ne sont pas identiques, car ni précédés ni suivis des mêmes consonnes. Cette observation capitale a rendu caduque toute une branche de la phonétique classique qui ordonnait les positions articulatoires en configurations bien définies mais statiques, c'est-à-dire sans tenir compte de leurs interférences.

L'analyse sonagraphique met encore en évidence l'intonation de la phrase : le relèvement des harmoniques sur la dernière syllabe traduit clairement une interrogation. C'est d'ailleurs toute la mélodie interne du discours, le *cantus obscurior*, bien observé déjà par les orateurs de l'Antiquité, qui pourrait faire l'objet d'une étude détaillée : par exemple, sur la figure 46, la phrase effectue une montée en deux temps, avec un

premier palier sur *tu*, suivi d'une descente sur *Si* qui sert de tremplin à la remontée terminale.

Le mouvement des composants, dans un spectre harmonique, peut prêter à confusion. Nous observons que sur les syllabes *tu* et *mon*, par exemple, les harmoniques aigus dévient davantage vers le haut que les graves. Cela s'explique aisément : si un fondamental de 1000 Hz octavie, sa fréquence passe de 1000 à 2000 Hz ; dans le même temps, l'harmonique 2 passe de 2000 à 4000 Hz, l'harmonique 3 de 3000 à 6000 Hz, et ainsi de suite. Pour un même intervalle, la différence de fréquence est plus grande pour les aigus que pour les graves, et la distance à franchir est de ce fait plus importante.

Un écart de 1000 Hz représente une 3ce mineure entre 5000 et 6000 Hz, une 2de majeure entre 8000 et 9000 Hz, mais une 8ve entre 1000 et 2000 Hz. En conséquence, de petits intervalles peuvent n'apparaître distinctement que dans le haut du spectre : toujours sur la syllabe *tu*, l'intonation montante puis descendante ne se décèle qu'à partir du 4ème harmonique environ.

Nombreux sont les domaines de recherche sur le langage à pouvoir bénéficier cette forme d'analyse, et d'une façon générale, tous ceux qui touchent à la structure acoustique de la phonation : étude typologique des accents régionaux, des débits caractéristiques, détermination des empreintes vocales, reconnaissance automatique de la parole. Les défauts de prononciation, comme d'ailleurs toutes les pathologies phonatoires, peuvent également être analysés, et le sonagraphe apporte une aide au diagnostic et la rééducation.

3. Le plan dynamique

Le type de représentation sonagraphique que nous venons d'étudier fournit des indications sur l'intensité, mais d'ordre comparatif, sans possibilités de mesures. Moyennant des changements de réglage, le sonagraphe peut délivrer deux autres types de diagrammes, faisant apparaître cette fois l'intensité en valeur chiffrée.

3.1. La courbe de niveau

Elle décrit l'évolution du niveau sonore dans le temps. L'intensité, en décibels, figure en ordonnée, et le temps, exprimé en secondes, est en abscisse (fig. 47 a) c'est donc l'intensité globale de chaque note qui se trouve ainsi mesurée. La fréquence ni la composition spectrale n'apparaissent donc plus.

3.2. La spectrographie en sections instantanées

Sur le plan spectral du sonagramme (fig. 47 b), l'intensité de chaque composant est indiquée par la plus ou moins grande densité (ou noirceur) de l'inscription. Pour une mesure précise, il est possible d'opérer une « coupe » dans un spectre à un instant t_0 (fig. 47 c) : la fréquence reste en ordonnée pour conserver le plan spectral, une ligne pointillée indiquant le point exact où a été effectuée la section ; puisqu'il s'agit d'un instantané, le temps n'est pas représenté, et l'intensité en décibels de chaque composant est mesurée en abscisse, par sa plus ou moins grande longueur.

4. L'analyse complète

En juxtaposant le plan spectral et le plan dynamique, on obtient une analyse quantifiée complète du signal sonore.

La figure 47 propose une courte phrase jouée par un violon. Le plan spectral b procure l'essentiel des informations tant acoustiques que musicales sur les paramètres du timbre, de la hauteur et du rythme ; comme nous l'avons vu, des renseignements sur l'intensité y figurent également sous une forme bien souvent suffisante.

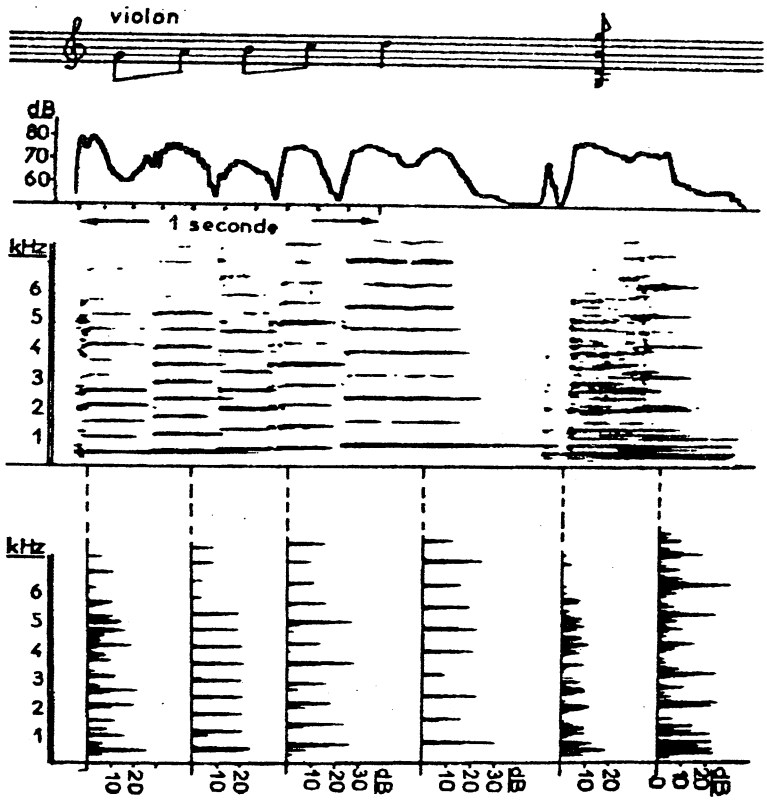


Fig. 47 : analyse sonagraphique complète

En a, l'intensité est mesurée pour chaque note séparément. L'irrégularité de cette courbe de niveau montre à quel point les sons musicaux évoluent vite, irrégulièrement, et par là même combien ils

véhiculent d'informations. L'analyse, très précise, prend même en compte le léger bruit des doigts se plaçant sur la touche pour jouer l'accord final.

En c, les sections instantanées indiquent, à un moment déterminé, le niveau des harmoniques de chacun des sons. Par exemple, la quatrième section, prise dans la note ré, montre que les harmoniques 1 et 9 sont les plus intenses, tout comme ceux de rangs impairs dans le bas du spectre ; cela correspond parfaitement aux indications — non chiffrées mais comparatives — du plan spectral.

La présence de partiels dans la première section n'est pas surprenante, car la coupe a été opérée juste après le transitoire d'attaque qui, pour un instrument à archet, est un bruit blanc de durée relativement importante. Les deux dernières sections contiennent à la fois des partiels provenant du transitoire initial, dus à l'emplacement des coupes, et plusieurs régimes harmoniques correspondant aux différentes notes de l'accord jouées simultanément.

Toutes les dimensions d'un objet sonore peuvent ainsi être appréhendées et mesurées avec précision. Toutefois, il faut toujours garder à l'esprit qu'un son musical n'est ni statique ni figé, mais dynamique, instable et continuellement changeant, « vivant » en quelque sorte , et que seules les analyses qui en tiennent compte et ne négligent rien de sa complexité procurent des résultats valables.

CHAPITRE VII

ANATOMIE DU SYSTÈME AUDITIF

1. Introduction

1.1. Données historiques

Schématiquement, il est possible de distinguer quatre grandes étapes dans la connaissance du système auditif humain.

La première époque, de beaucoup la plus longue, mais la moins fructueuse, est celle de l'Antiquité et du Moyen Age, qui produit surtout des spéculations à partir d'hypothèses métaphysiques ou d'observations encore fragmentaires.

Avec la Renaissance, les connaissances en anatomie se développent considérablement grâce aux dissections de cadavres, et ce malgré les interdictions de l'Église. Quelques jalons donneront une idée des nombreux travaux entrepris à l'époque. Le Flamand André Vésale (1514-1564), fondateur de l'anatomie moderne, est le premier à s'attaquer aux thèses encore toutes-puissantes de l'Antiquité. Il publie en 1543 un grand traité, *De corporis humani fabrica*, dans lequel il étudie l'oreille moyenne (Livre VII), y trouvant deux osselets (en réalité, il y en a trois). Son élève en Italie, Gabriel Fallope (1523-1562), est l'auteur de nombreuses

découvertes consignées dans son célèbre ouvrage *Observationes anatomica* paru en 1561. Il y décrit la cochlée dans l'oreille interne, et attribue un rôle important à l'air dans les phénomènes auditifs. Au même moment, en 1563, Bartolomeo Eustachi (1500-1574) découvre un canal reliant l'oreille moyenne au pharynx, auquel il donne son nom (la trompe d'Eustache).

Jusqu'au XIX^{ème} siècle, les observations s'accumulent, dessinant une image de plus en plus précise du système auditif. Grâce au microscope, Alfonso Corti donne une description détaillée de la structure cellulaire des organes sensoriels de l'oreille interne (1851) ; cette époque est aussi celle des premières théories cohérentes de l'audition (Helmholtz, théorie de la résonance, 1857).

Où en est-on à l'heure actuelle ? Sur le plan anatomique, tout est connu, ou presque, jusqu'au niveau moléculaire. Pour la physiologie, c'est loin d'être le cas, mais grâce à des technologies de pointe (laser, ordinateur, scanner, modélisation, micro-chirurgie, etc), les spécialistes proposent des hypothèses de fonctionnement de plus en plus vraisemblables et admises par le plus grand nombre. Il reste enfin que l'oreille est connectée au cerveau, et qu'en ce domaine également, malgré les énormes progrès de la neurobiologie sensorielle, tout est loin d'être élucidé.

1.2. Présentation

L'organe de l'ouïe est d'une extraordinaire complexité, comprenant des millions d'éléments logés dans des cavités de quelques centimètres, creusées dans l'os le plus dur du corps humain, le *rocher*. Il est traditionnellement divisé en trois parties (fig. 48) : l'oreille externe, seul élément visible de l'extérieur, qui capte les ondes sonores, l'oreille

moyenne, qui les transforme en oscillations mécaniques, et l'oreille interne qui les code en un langage accessible au cerveau.

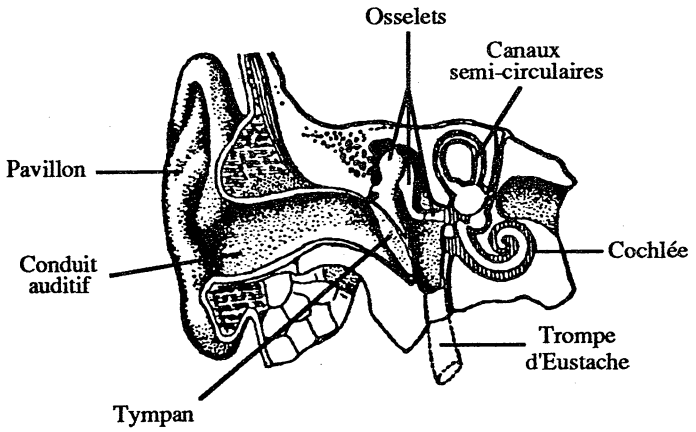


Fig. 48 : le système auditif

Par souci de clarté, l'étude du système auditif sera partagée en deux sections: l'anatomie d'abord, qui décrit les organes essentiels ; la physiologie ensuite, qui en explique le fonctionnement, et essaie de l'intégrer et de le systématiser en une théorie de l'audition.

Pour des raisons techniques, il n'a pas été possible de multiplier dans ce cours les dessins et schémas explicatifs. Ceux qui sont proposés constituent donc à la fois l'essentiel et le minimum, et il est vivement conseillé de se reporter à des ouvrages spécialisés (cf. Bibliographie) ou même à de bonnes encyclopédies, qui fourniront le complément iconographique nécessaire.

2. L'oreille externe

2.1. Le pavillon

Le pavillon est une lame cartilagineuse en forme d'entonnoir évasé, constituée de plis et d'anfractuosités revêtant un caractère individuel, tout

comme les empreintes digitales. La conque, partie centrale entourée par l'hélix, s'ouvre sur le conduit auditif.

2.2. Le conduit auditif

Long de 2,5 cm environ et 0,7 cm de diamètre, le conduit auditif externe, de forme légèrement coudée, est obturé vers l'intérieur par le tympan. Il est tapissé d'une fine pilosité et contient des glandes qui sécrètent le cérumen, cire visqueuse de couleur brunâtre.

3. L'oreille moyenne

L'oreille moyenne, ou caisse du tympan est une cavité d'environ 2 cm^3, remplie d'air comme l'oreille externe. Elle comprend différents éléments : le tympan, des muscles, des ligaments et la trompe d'Eustache. Elle communique avec l'oreille interne par deux orifices obturés par une membrane, la fenêtre ovale et la fenêtre ronde (fig. 49).

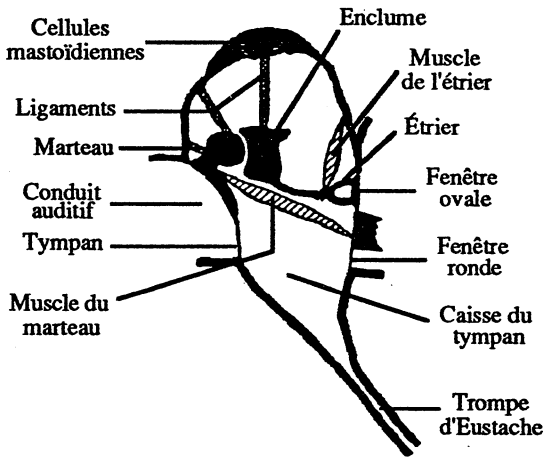


Fig. 49 : l'oreille moyenne

3.1. Le tympan

Le tympan est une membrane concave vers l'extérieur, de 1 cm de diamètre et de 1/10ème de mm d'épaisseur. Élastique et très résistant, il est constitué de fibres radiaires et circulaires, le tout recouvert d'épiderme.

3.2. Les osselets

Les osselets forment une chaîne comprenant le marteau, dont le manche est inséré dans la membrane tympanique ; l'enclume, sur laquelle s'appuie la tête du marteau, et qui se prolonge par une branche, l'apophyse lenticulaire, articulée à la tête de l'étrier ; celui-ci, le plus petit os du squelette, coulisse dans la fenêtre ovale par son autre extrémité, la platine, en contact avec l'oreille interne.

Les trois osselets sont articulés entre eux ; toutefois la liaison marteau-enclume se soude peu après la naissance.

3.3. Les muscles et les ligaments

La chaîne des osselets est maintenue en suspension élastique par des ligaments qui relient le marteau et l'enclume à la paroi de l'oreille moyenne. L'étrier est maintenu dans la fenêtre ovale par un ligament annulaire.

Deux muscles de type long et strié, appelés muscles tympaniques, sont rattachés l'un au col du marteau (muscle tenseur du tympan) et l'autre à la tête de l'étrier (muscle de l'étrier).

3.4. La trompe d'Eustache

La communication de la caisse du tympan avec l'extérieur est assurée par la trompe d'Eustache, conduit ostéo-cartilagineux qui débouche dans le naso-pharynx ou arrière-gorge. Fermée en régime normal, elle s'ouvre à chaque déglutition (qui se produit inconsciemment environ une fois par minute, beaucoup plus au cours de l'alimentation), également lors du mouchage ou de forts bâillements.

4. L'oreille interne

L'oreille interne possède une structure si complexe qu'elle a mérité le nom de labyrinthe. La figure 50 montre un schéma simplifié de l'oreille interne. Le labyrinthe osseux (en blanc) est un ensemble de cavités creusées dans le rocher (en pointillé), comprenant deux parties : le vestibule à gauche et le limaçon à droite. Il est rempli d'un liquide, la périlymphe.

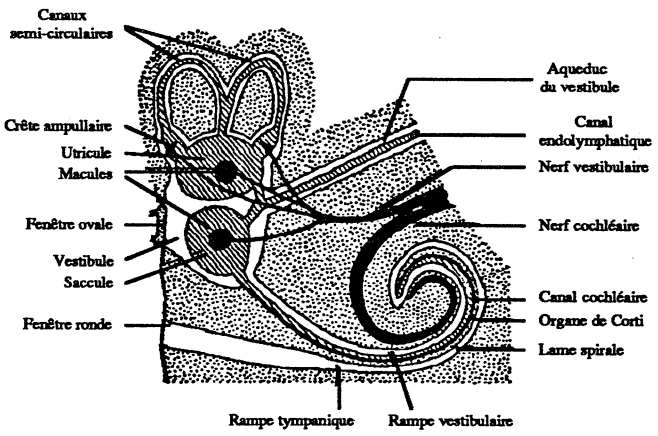


Fig. 50 : l'oreille interne

En suspension dans ce liquide et épousant les contours du labyrinthe osseux, le labyrinthe membraneux (en hachuré) est constitué de petits

sacs communiquant les uns avec les autres, et qui contiennent eux aussi un liquide appelé endolymphe.

4.1. Le vestibule

4.1.1. Les canaux semi-circulaires

Ils sont au nombre de trois (la figure 50 n'en montre que deux), en forme de tubes recourbés en demi-cercles, et disposés selon trois plans perpendiculaires les uns aux autres. Chacune de leur base présente un renflement, la crête ampullaire où siègent des capteurs sensoriels.

4.1.2. L'utricule et le saccule

Les canaux semi-circulaires débouchent dans l'utricule. De taille légèrement plus grande que le saccule, l'utricule communique avec celui-ci par un canal de réunion sur lequel se connecte un étroit cul-de-sac, le canal endolymphatique. L'utricule et le saccule contiennent chacun un organe sensoriel appelé macule, ainsi que de fines concrétions calcaires, les otolithes.

4.1.3. L'innervation

Les crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires et les macules de l'utricule et du saccule contiennent des cellules nerveuses, des neurones, qui captent les informations ; leurs axones se réunissent pour former le nerf vestibulaire, qui, se joignant au nerf cochléaire, constitue le VIII^{ème} nerf crânien, ou nerf auditif.

4.2. Le limaçon

Le limaçon osseux est un canal creusé dans le rocher, rétrécissant vers son extrémité opposée à la fenêtre ovale. Il est enroulé 2 fois 3/4 sur lui-même, comme une coquille d'escargot (d'où son nom), autour d'un axe creux et conique, la columelle.

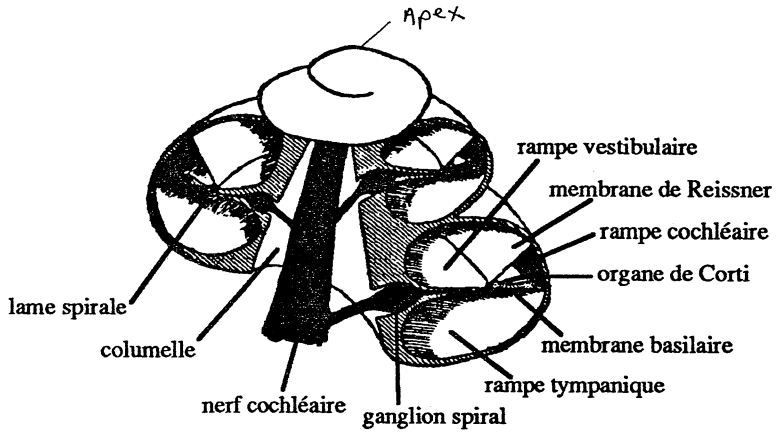


Fig. 51 : le limaçon

Le limaçon contient de la périlymphe dans laquelle baigne, sur toute sa longueur, la cochlée ou limaçon membraneux. Celle-ci divise le limaçon osseux en trois canaux ou rampes, comme le montre la coupe transversale de la figure 51 : la cochlée elle-même, au milieu, forme le canal cochléaire ; au-dessus, la rampe vestibulaire prend naissance, comme son nom l'indique, dans le vestibule au niveau de la fenêtre ovale ; au-dessous, la rampe tympanique aboutit à la fenêtre ronde. Ces deux rampes communiquent à l'extrémité du limaçon par un petit orifice, l'hélicotrème.

4.2.1. La cochlée

La cochlée, de section triangulaire, est constituée à sa base par la membrane basilaire. Celle-ci est attachée d'un côté au ligament spiral,

qui tapisse la paroi externe du limaçon, et de l'autre côté à un prolongement osseux venant de la columelle, la lame spirale (fig. 52).

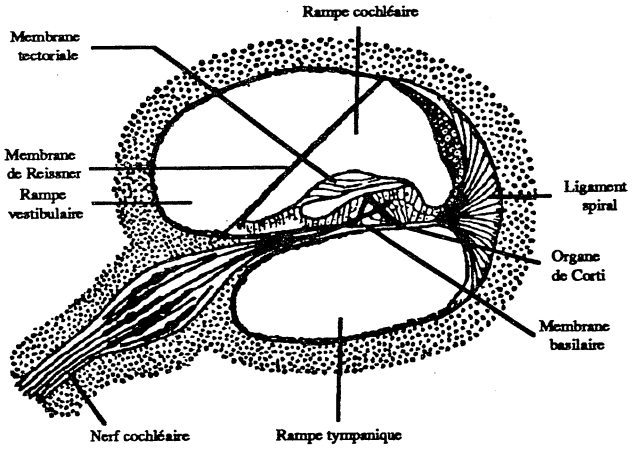


Fig. 52 : la cochlée

La paroi supérieure, formant un angle aigu avec la membrane basilaire, est la membrane de Reissner, séparant le canal cochléaire de la rampe vestibulaire.

Le troisième côté de la cochlée est la paroi osseuse interne, appelée parfois lame des contours. La cochlée, emplie d'endolymphe, comme tous les sacs membraneux du labyrinthe, contient l'organe de Corti.

4.2.2. L'organe de Corti

La membrane basilaire, relativement épaisse, est longue d'environ 32 mm, et de largeur croissante vers le sommet du limaçon : 0,04 mm à la base, pour 0,5 mm à l'apex. Sa rigidité varie également, dans des proportions considérables, d'un facteur de 1 à 200 de l'apex vers la base. L'organe de Corti est disposé sur toute sa longueur.

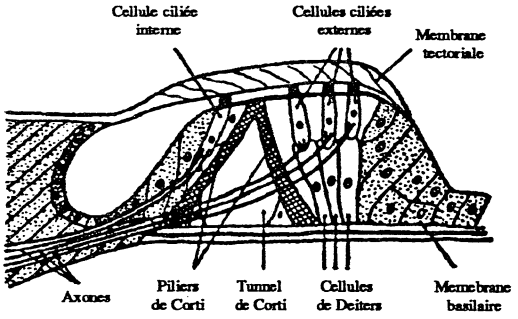


Fig. 53 : l'organe de Corti

La figure 53 est un grossissement du centre de la figure 52. L'organe de Corti comprend différents éléments :

a) les piliers de Corti, au nombre de 10 000 environ, se joignent à leur sommet, pour former les 5000 arcades du tunnel de Corti ;

b) les cellules de soutien, dites de Deiters, supportent les cellules sensorielles :

c) les cellules de Corti, reposant sur leurs supports, ne sont donc pas en contact direct avec la membrane basilaire. Elles sont de deux sortes, réparties de part et d'autre du tunnel de Corti : les cellules ciliées externes (CCE) et les cellules ciliées internes (CCI). Les CCE sont environ 12 000, alignées sur trois rangs dans le premier tour du limaçon (tour basal), sur quatre dans le deuxième tour, et sur cinq dans les 3/4 de tour restants (tour apical) ; cette disposition paraît logique, puisque la membrane basilaire s'élargit vers l'apex. Les CCI ne sont que 3 500, disposées sur une seule rangée ;

d) la membrane tectoriale recouvre l'organe de Corti et est solidaire des cellules sensorielles dont les cils la pénètrent.

4.2.3. L'innervation

Toutes les cellules de Corti sont en contact avec des fibres nerveuses provenant du ganglion spiral. Celui-ci est constitué d'environ 25 000

cellules nerveuses, ou neurones, dont les axones passent par la columelle et se réunissent pour former le nerf cochléaire.

Le nerf cochléaire devient le nerf auditif après jonction avec le nerf vestibulaire. Il se dirige vers le système nerveux central en un trajet compliqué et indirect, passant par différents relais, notamment le bulbe rachidien et le thalamus.

Le nerf auditif parvient enfin à la partie la plus périphérique du cerveau, la plus récente dans l'évolution des êtres vivants, le cortex cérébral, siège de l'intelligence et de la pensée personnelle. Ses terminaisons se distribuent le long de l'aire de projection auditive, située dans la première circonvolution temporale. A ce stade, s'établissent d'innombrables connexions qui mettent en relation entre elles toutes les aires de projection des autres organes sensoriels, rendant ainsi possibles les associations entre les différentes stimulations.

En plus de ces voies nerveuses, appelées afférentes car allant de la périphérie au cerveau, il existe un autre faisceau, dit efférent, qui part du cerveau pour le système auditif, assurant ainsi la présence de celui-ci au cœur même de l'oreille interne.

CHAPITRE VIII

PHYSIOLOGIE DU SYSTÈME AUDITIF

Après avoir examiné la structure de l'oreille et les principaux éléments dont elle se compose, étudions maintenant son fonctionnement, en suivant le trajet d'une onde sonore et ses avatars au sein du système auditif.

1. L'oreille externe

1.1. Dispositifs de sécurité

Indépendamment des éléments dont la fonction est purement auditive, l'oreille possède certains dispositifs destinés à la protéger, ou à en contrôler le fonctionnement.

Dans l'oreille externe, la forme coudée du conduit auditif empêche (ou limite) — particulièrement chez les enfants — la pénétration d'objets droits et rigides, susceptibles de crever accidentellement le tympan.

De même, la pilosité tapissant le conduit peut retenir grains de poussière ou parasites extérieurs, et protéger ainsi la membrane tympanique.

Le cérumen a pour fonction de « lubrifier » le tympan et d'entretenir son élasticité.

1.2. Fonctionnement

L'oreille externe, et particulièrement le pavillon, joue un rôle important dans la détection et la localisation des sources sonores cf. chap. IX). Cela est évident chez certaines espèces animales qui peuvent orienter facilement leurs pavillons. Chez l'homme, les muscles permettant cette orientation sont rudimentaires et atrophiés.

Certains auteurs reconnaissent au pavillon, en plus de son effet focalisateur, une fonction d'adaptateur d'impédance entre le milieu extérieur et le conduit auditif : en amortissant l'onde qui pénètre dans l'oreille, le pavillon l'adapterait à ses nouvelles conditions de propagation et, permettant un meilleur transfert d'énergie, jouerait en quelque sorte le rôle d'une antenne en électronique[1].

Quant au conduit auditif, dont le rôle est de guider les ondes jusqu'au tympan, il possède une fréquence propre aux environs de 3 500 Hz, ce qui entraîne une élévation de la sensibilité auditive autour de cette valeur, par effet de résonance.

2. L'oreille moyenne

2.1. Mécanismes de protection et de régulation

Le tympan est recouvert d'épiderme, ce qui lui permet de repousser et de cicatriser après une déchirure ou un percement volontaire (paracentèse en cas d'otite, pour évacuer le pus). Son innervation dense

---

[1] Cf. notamment J.V. Tobias éd., *Foundations of Modern Auditory Theory*, 2 vol., New York, 1970.

lui confère une grande sensibilité, et la douleur, en cas d'agression, joue le rôle d'un signal d'avertissement.

Le tympan est très peu sélectif, grâce à ses fibres à la fois radiaires et circulaires qui ne privilégient pas de fréquences particulières : il est donc apte à capter sans distorsion un large éventail spectral de 16 à 20 000 Hz (dans le meilleur des cas), comme aucun microphone n'y parvient actuellement.

Les muscles tympaniques, par leur contraction, raidissent la chaîne des osselets et diminuent l'amplitude réellement transmise à l'oreille interne : le système nerveux central peut donc intervenir directement dans le processus de transmission de l'onde sonore, et adapter en permanence le niveau reçu. Une expression comme « tendre l'oreille » (mais qui consiste à *décontracter* les muscles) rend bien compte d'une action qui peut devenir en partie volontaire.

Pour qu'elle puisse vibrer normalement, la même pression aérienne doit s'appliquer de part et d'autre d'une membrane. Or, aussi bien la pression atmosphérique que celle qui règne dans l'oreille moyenne (et qui doit être identique) sont susceptibles de variations. Comme la trompe d'Eustache communique avec l'extérieur, elle rétablit, chaque fois qu'elle s'ouvre, l'égalité entre les deux faces du tympan.

2.2. Fonctionnement

Les ondes sonores captées par l'oreille externe sont transmises à l'oreille interne par la chaîne des osselets. Les vibrations de l'air sont ainsi transformées en oscillations mécaniques de même fréquence, mais d'amplitude variable par l'action des muscles tympaniques.

Cette transformation du signal est rendue nécessaire par le fait que le milieu aérien d'où vient l'onde et le milieu liquide du labyrinthe sont d'impédances très différentes. Le rôle des osselets est d'assurer la

meilleure transmission possible en changeant la nature du mouvement vibratoire.

Mais de plus, la chaîne ossiculaire amplifie le signal, et ceci par deux procédés différents. D'abord, les osselets sont articulés en bras de levier, réduisant la course de l'étrier par rapport à celle du marteau et multipliant ainsi la force par 3 (il n'y a pas de rapport entre cette valeur et le nombre d'osselets). Ensuite, parce que la surface de la fenêtre ovale est vingt fois plus petite que celle du tympan, l'amplification totale est égale à : 3 x 20 = 60 fois.

L'oreille moyenne modifie également la forme du signal. En effet, les ligaments qui maintiennent les osselets ne sont disposés que d'un seul côté de la chaîne (cf. fig. 49) ; lorsque celle-ci est excitée, leur force de rappel élastique modifie la forme du mouvement, favorise l'asymétrie des demi-périodes, ce qui a pour effet la création d'harmoniques.

2.3. Aspects phylogénétiques

L'oreille interne, dont les organes sensoriels sont remplis de liquide, était parfaitement bien adaptée à la vie sous-marine. Elle est une des traces de l'évolution de notre espèce, issue de poissons qui, au cours de millions d'années, abandonnèrent progressivement le milieu aquatique pour devenir amphibiens.

Une adaptation à l'audition aérienne est devenue nécessaire, et c'est précisément l'oreille moyenne qui remplit cette fonction. Les poissons actuels ont des mâchoires formées de plusieurs os ; chez les reptiles, apparus plus tard, plusieurs de ces os se sont déplacés pour constituer l'oreille moyenne et chez les mammifères, situés encore plus haut dans l'échelle évolutive, la mâchoire n'est constituée que d'une seule pièce, mais l'oreille moyenne comporte trois osselets.

3. L'oreille interne

3.1. Fonction des capteurs vestibulaires

Les organes du vestibule renseignent le système nerveux central (SNC) sur notre position dans l'espace et lui permettent de gérer notre équilibre. Ils remplissent des fonctions différentes et complémentaires.

Les crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires sont des organes rotatorécepteurs, c'est-à-dire sensibles aux accélérations angulaires : lors des mouvements rotatifs de la tête, l'endolymphe est entraînée et déplace les cellules sensorielles des crêtes ampullaires ; ainsi stimulées, les cellules délivrent des influx en direction du SNC. De par la disposition des canaux semi-circulaires, le déplacement est analysé en trois dimensions.

Les macules de l'utricule et du saccule sont des organes statorécepteurs ; ils ne sont pas sensibles aux mouvements mais à la position de la tête. Les otolithes, soumis à la pesanteur, reposent en des points différents selon la position de la tête, provoquant ainsi l'excitation des cellules correspondantes ; celles-ci avertissent de ce contact les centres nerveux qui règlent la posture et gèrent l'équilibre du corps par l'intermédiaire des muscles concernés. L'utricule est spécialisé dans la détection des positions horizontales, le saccule plutôt dans celle des positions verticales.

L'appareil auditif est le premier organe sensoriel à se mettre en place au cours du développement embryonnaire du fœtus, et au sein de celui-ci, le vestibule apparaît en premier. C'est la reproduction de ce qui se produit au niveau phylogénétique, et chez les poissons les plus archaïques, comme l'*ostracoderme* de l'époque dévonienne (300 millions d'années), on trouve déjà des traces de canaux semi-circulaires.

Il est facile de mettre en évidence l'importance des capteurs vestibulaires, par exemple en tournant rapidement sur soi-même puis en s'arrêtant brusquement : la sensation de « tournis » alors éprouvée est due à l'inertie de l'endolymphe, et les informations communiquées au SNC, quoique ne correspondant plus à la réalité,

risquent d'être tout de même prises en compte, ce qui peut provoquer un déséquilibre du corps.

C'est l'un cas où les données du vestibules priment sur la conscience de la situation (le cerveau sait que le corps est immobile) et même sur celles de la vision, qui participe également à l'équilibration : on « voit » tourner la pièce autour de soi, le décalage des sensations pouvant provoquer un vertige.

3.2. La déformation de cochlée

Une onde aérienne est transformée en oscillations mécaniques par l'oreille moyenne. L'étrier transmet ces oscillations au limaçon par la fenêtre ovale. Le mouvement pénètre dans la rampe vestibulaire, les compressions de la périlymphe repoussent le canal cochléaire dans la rampe tympanique, dont la périlymphe à son tour fait incurver sous sa pression la fenêtre ronde vers l'oreille moyenne. Aux basses fréquences, une partie de l'énergie passe d'une rampe l'autre par l'hélicotrème.

Dans l'oreille interne, l'onde se présente donc sous forme de variations de pression du liquide périlymphatique produisant des déformations de la cloison cochléaire ; les mouvements des cellules ciliées sont provoqués par les déplacements de la membrane basilaire et de la membrane tectoriale baignée d'endolymphe. Les deux membranes ne sont pas animées du même mouvement, d'où un « cisaillement » des cellules de Corti qui provoque leur excitation.

3.3. La loi du « tout ou rien »

Lorsque les cellules de Corti sont stimulées, elles délivrent des influx nerveux dont la valeur ne dépend pas de la grandeur de la stimulation. C'est le principe du « tout ou rien » : au-dessous d'un certain seuil, la cellule ne répond pas ; à partir d'un certain seuil elle répond, et toujours de la même façon, quelle que soit la grandeur de la stimulation ; enfin, si

la stimulation est trop grande, la cellule peut être endommagée ou même détruite.

4. Théorie de l'audition

La simple description des mouvements physiques produits dans la cochlée ne peut rendre compte à elle seule du fonctionnement de l'audition. Les faits observés doivent être expliqués et justifiés de façon cohérente. C'est précisément le rôle de la théorie de l'audition.

4.1. Survol historique

Pythagore avait déjà reconnu la nature vibratoire du son. Les savants qui lui succédèrent comprirent que ces vibrations se propagent dans l'air, frappent le tympan, et pénètrent dans l'oreille. Hippocrate, au IV^{ème} s. av. J.-C., pensait que les os de la tête communiquaient directement le son au cerveau, mais Galien (≈ 175 ap. J. -C.) comprit que ce sont les nerfs qui véhiculent la sensation.

Tous les savants admettaient alors que le siège de l'audition était une poche d'« air implanté » à l'intérieur de l'oreille, hermétiquement close, et qui reproduisait fidèlement les vibrations sonores venant de l'extérieur.

Lorsque l'anatomie de l'oreille moyenne fut mieux connue, notamment grâce aux travaux de Vésale, Ingrassia et surtout d'Eustachi à la Renaissance (cf. chap. précédent), on se rendit compte qu'aucune poche d'air étanche ne pouvait s'y trouver ; celle-ci fut donc située dans l'oreille interne, où ses vibrations devaient exciter les terminaisons du nerf auditif.

C'est seulement deux siècles plus tard, en 1760, que Domenico Cotugno affirma que le liquide contenu dans la cochlée la remplissait complètement et ne laissait aucune place pour de l'air. C'est ce que

confirma l'Allemand Philipp Meckel en 1777, qui observa une oreille interne après l'avoir fait geler toute une nuit d'hiver...

Au XVIIème s. apparaissent les premiers travaux sur la sensation musicale, et particulièrement sur la perception de la hauteur. En 1605, Gaspard Bauhin, de l'Université de Bâle, suggère que les cavités du limaçon entrent en résonance sous l'effet de l'onde sonore, leurs différents volumes répondant à des fréquences différentes, les graves reçus dans les cavités les plus grandes, les aigus dans les plus petites.

En 1683, dans son *Traité de l'Organe de l'Ouïe*, Joseph Guichard du Vernay attribue un rôle fondamental à la lame spirale. Observant qu'elle devient de plus en plus étroite, il déduit que ses différentes parties réagissent à des fréquences différentes : les portions larges, vibrant plus lentement, répondent aux sons graves, les plus étroites, plus rapides, aux aigus et *"le nerf qui est réparti sur toute sa surface reçoit des impressions différentes qui représentent dans le cerveau des caractéristiques sonores diverses"*.

Il fallut attendre la découverte par Corti, en 1851, de la structure cellulaire de la cochlée pour que l'hypothèse de du Vernay fût abandonnée. Peu après, Helmholtz put formuler sa célèbre théorie, qui conservait le principe de la résonance sélective de Bauhin et Du Vernay, mais situait le phénomène dans l'organe de Corti : les fibres transversales qui constituent la membrane basilaire sont de plus en plus tendues puisque celle-ci s'élargit vers l'apex. Elles répondent donc toutes à des fréquences différentes et peuvent ainsi analyser une onde complexe.

4.2. La mécanique cochléaire

Les recherches de Georg von Békésy sont à l'origine des théories modernes de l'audition[1]. Il a imaginé des modèles mécaniques simulant le comportement de la cochlée en fonctionnement, mais a aussi observé des oreilles internes prélevées sur des cadavres frais, réalisant de véritables tours de force expérimentaux : pour rendre les membranes plus visibles, il déposait dessus un fine poudre d'argent ; après avoir aminci en plusieurs points la paroi osseuse jusqu'à la transparence, il imposait des mouvements vibratoires à l'étrier et pouvait observer les mouvements ainsi produits dans les différents tours de spire avec un microscope sous éclairage stroboscopique.

Il a constaté que, lorsque l'étrier oscille dans la fenêtre ovale, la membrane basilaire vibre avec un maximum d'amplitude localisé différemment selon la fréquence : situé près de l'apex pour les basses fréquences, il se déplace vers la base lorsque la fréquence augmente (fig. 54) :

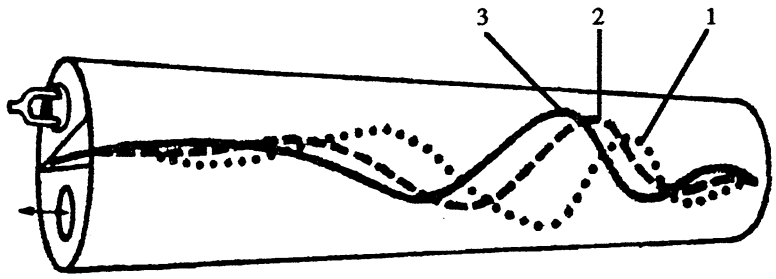


Fig. 54 : modélisation de la cochlée

Ce modèle simplifié de cochlée indique la position du maximum d'amplitude d'une perturbation en fonction de sa fréquence : les tracés

---

1 G. von Békésy, *Experiments in Hearing*, New York, 1960.

pointillés, en tirets et en trait plein montrent respectivement des hauteurs croissantes.

Après des observations complémentaires sur des oreilles humaines, Békésy affina ses résultats et obtint des valeurs chiffrées : à partir de 800 Hz environ, les vibrations sont de très faible amplitude à la partie apicale de la cochlée, et celle-ci reste pratiquement immobile ; plus la fréquence augmente, plus longue est la portion de membrane basilaire à rester statique à l'apex. Ces conclusions sont schématisées sur la figure 55.

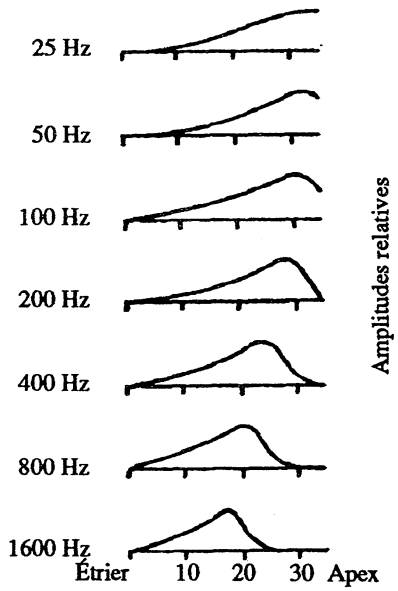


Fig. 55 : la tonotopie cochléaire

Ces courbes mesurent l'amplitude du mouvement vibratoire (en ordonnée) des différents points de la membrane basilaire, dont la distance à la base du limaçon est portée en abscisse. Elles montrent que :

- pour chaque fréquence, un point de la membrane vibre de façon plus ample que les autres ;
- ce maximum d'amplitude se rapproche d'autant plus de la base du limaçon que la fréquence est plus élevée ;

•le maximum d'amplitude est d'autant plus aplati que la fréquence est plus basse, et d'autant plus « pointu » qu'elle est plus élevée.

Comme les cellules de Corti obéissent au principe du tout ou rien, seules fonctionnent celles qui sont concernées par un maximum d'amplitude.

4.3. Codage de la hauteur

Il existe donc une tonotopie, ou « carte des hauteurs » le long de la cochlée. Mais les chercheurs ont été frappés depuis longtemps par le contraste existant entre la rusticité de cette tonotopie et l'extrême finesse de la sensibilité humaine aux hauteurs. Des résultats récents viennent éclairer d'un jour nouveau le fonctionnement de la cochlée[1].

Lorsque les CCE sont stimulées, elles se contractent et rigidifient leurs cils, ce qui amplifie le mouvement relatif de la membrane tectoriale : les CCE concernées par la stimulation « s'accordent » finement, augmentant la sensibilité et la sélectivité de la membrane basilaire à cet endroit. Les CCI correspondantes transforment le message vibratoire en influx nerveux qui seront transmis au cerveau. Dans ce schéma de fonctionnement, les CCE jouent en quelque sorte le rôle d'un « préamplificateur », préparant le travail des CCI.

D'autre part, le câblage nerveux des CCE et celui des CCI est tout à fait distinct : les CCI sont connectées au nerf auditif et font donc partie du système afférent (*vers* le système nerveux central), alors que les CCE sont principalement sous la dépendance du système efférent (*venant* du SNC). Elles reçoivent donc des ordres directement des centres nerveux, ce qui bouleverse les conceptions classiques de l'audition. Il est désormais

---

[1] Cf. notamment P. Bonfils, M.-C. Rémond, R. Pujol, "Efferent tracts and cochlear frequency selectivity", *Hearing Research*, 24, 1986.

possible de comprendre certains phénomènes demeurés jusqu'ici mystérieux, comme l'écoute sélective (cf. chap. IX).

Lorsque l'oreille est stimulée, le nerf auditif achemine les influx nerveux vers le cerveau. Comme tous les nerfs, il possède une période réfractaire, c'est-à-dire qu'après chaque influx, il doit « se reposer » et ne peut plus rien transmettre pendant un certain temps, dans le cas présent d'une durée de 1/1000ème de seconde. La fréquence maximum que le nerf puisse conduire dans ces conditions est donc de 1000 Hz, puisque il ne saurait y avoir plus de 1000 périodes réfractaires en une seconde. Pour transmettre des fréquences plus élevées, les fibres du nerf, c'est-à-dire les axones, ne fonctionnent pas toutes simultanément : aux environs de 1000 Hz, les axones se divisent en deux groupes, chacun répondant une fois sur deux : la fréquence reste inchangée, mais chaque fibre travaille deux fois plus lentement ; le même phénomène se reproduit vers 2000 Hz, et les axones ne travaillent plus qu'une fois sur trois.

Le nerf auditif transmet donc de façon synchrone les fréquences cochléaires jusqu'à 3000 Hz. Au-delà, c'est la localisation des cellules de Corti stimulées (tonotopie) qui renseigne le SNC sur la fréquence du son, localisation rendue possible puisque depuis 800 Hz, la membrane basilaire ne vibre plus dans toute sa longueur.

En résumé, depuis les basses fréquences jusqu'à 3000 Hz environ, le nerf fonctionne en synchronisation avec la cochlée, monophasée jusqu'à 1000 Hz, biphasée de 1000 à 2000 Hz, et triphasée de 2000 à 3000 Hz ; à partir de 800 Hz pour les hautes fréquences, intervient le système de la localisation ; de 800 à 3000 Hz, les deux procédés existent simultanément.

4.4. Codage de l'intensité

Le principe en est encore mal connu au niveau cochléaire. Une cellule de Corti, obéissant au principe du tout ou rien, c'est-à-dire

donnant toujours la même valeur à l'impulsion, ne peut à elle seule rendre compte de l'intensité d'un stimulus. Mais si un son est plus intense, la perturbation mécanique est plus forte, et le nombre de cellules excitées plus grand sur la membrane basilaire. Il est probable que cette plus ou moins grande quantité de cellules stimulées pour des fréquences égales mais d'amplitudes différentes soit précisément la traduction du code de l'intensité dans la cochlée.

Les impulsions circulant le long du nerf ne possèdent elles aussi qu'une seule valeur. Mais dans un nerf, l'intensité d'une stimulation est rendue par la fréquence, ce qui complique singulièrement les choses, ce code étant déjà utilisé pour la traduction de la hauteur.

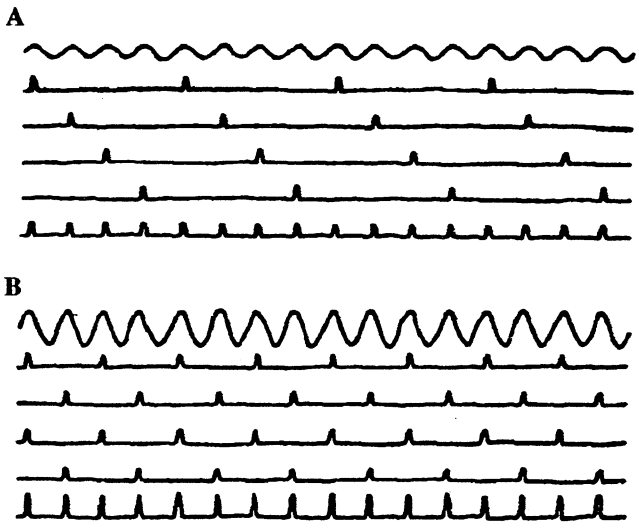


Fig. 56 : théorie de la volée

Comme l'ont montré Wever et Bray dans leur célèbre *Théorie de la volée* (1949), les fibres, au sein d'un groupe, ne réagissent pas toutes simultanément, et lorsque l'intensité augmente, la fréquence de chaque fibre augmente sans toutefois modifier la réponse globale du nerf (fig. 56). Il intervient également un *recrutement* de fibres, qui sont donc de plus en

plus nombreuses. Le nombre d'axones du nerf auditif (30 000) semble suffisant pour assurer cette fonction.

La figure 56 montre en A un groupe de quatre fibres qui répondent une fois sur quatre ; en B, la fréquence de leur réponse est deux fois plus élevée, mais la réponse globale du nerf reste la même, parce que les influx des différentes fibres tombent en même temps. Pour le système nerveux central, cela se traduit par une augmentation de l'intensité, et non de la fréquence.

CHAPITRE IX

L'ORIENTATION AUDITIVE

L'orientation auditive est la faculté qui nous permet de localiser une source dans l'espace environnant, et de détecter sa provenance. S'il paraît aujourd'hui évident que c'est la coopération des deux oreilles qui offre cette possibilité, ce fut loin d'être toujours le cas, et cette idée mit beaucoup de temps à s'imposer.

1. Survol historique

Le philosophe grec Zénon de Citium (≈335–≈264 av. J.-C.), fondateur du stoïcisme, enseignait que la nature a donné aux hommes une langue et deux oreilles, afin qu'ils puissent écouter deux fois plus que parler. Beaucoup plus près de nous était encore répandue l'idée que les deux oreilles n'étaient qu'un exemple de symétrie bilatérale, et qu'à l'instar des poumons ou des reins, le second organe était prêt à remplacer le premier en cas de déficience.

La fonction d'orientation auditive a été établie pour la première fois par le biologiste italien Lazzaro Spallanzani (1729-1799), à la fin du XVIII^{ème} s. : à l'issue d'une étude sur les chauves-souris, il affirma que

ces animaux « voyaient » avec leurs oreilles, et étaient capables d'éviter des obstacles uniquement grâce à elles.

L'opposition scientifique fut très forte, notamment celle de Cuvier à l'époque[1], et au milieu du XIX^{ème} s. le psychologue écossais Alexander Bain pouvait encore écrire que l'audition binauriculaire ne jouait strictement aucun rôle dans la localisation des sons[2].

Ce sont les travaux de Lord Rayleigh[3], à partir de 1876, qui apportèrent les premiers résultats réellement scientifiques, avec la découverte de mécanismes que nous étudierons plus loin.

Enfin, les recherches menées par Harvey Fletcher (1884-1981) aux Laboratoires Bell de New York dans les années 1930 sur la stéréophonie[4] ont fourni une importante contribution expérimentale à ce problème.

2. L'audition binaurale

Lorsque une source sonore est décentrée par rapport à la tête, les oreilles ne captent pas le même message : le cerveau reçoit et traite des informations non identiques, ces différences de perception lui permettant de localiser la source. Il va de soi que si la source se trouve à égale distance des deux oreilles, c'est l'absence même de différence perceptive qui permet de reconnaître sa position centrée.

La localisation complète d'une source sonore suppose trois opérations :

- une **localisation circulaire**, autour du sujet, c'est-à-dire sur une circonférence dont la tête est le centre ;

---

1 Cf. *Leçons d'anatomie comparée,* Paris, 1800-1805.
2 A. Bain, *The Senses and the Intellect,* Londres, 1855.
3 J. Rayleigh, *Theory of Sound,* 1895.
4 H. Fletcher, *Speech and Hearing in Communication,* New York, 1953.

•une **appréciation de l'élévation,** de l'éloignement en hauteur par rapport au sol ;

•une **appréciation de la distance,** de l'éloignement dans le plan horizontal ;

Il s'agit donc d'une opération complexe qui met en jeu des fonctions différentes du système auditif.

2.1. La localisation circulaire

C'est la plus précise, la plus importante, et la mieux connue. Le système nerveux central exploite, comme nous venons de le voir, des différences de perception entre les deux oreilles, intéressant trois paramètres :

•**différence d'intensité** : la tête fait écran, le son s'amortit d'une oreille à l'autre ;

•**différence de phase** : les oreilles étant spacialement décalées par rapport à la source, elles ne sont pas en phase ;

•**différence de temps** : le son met un certain temps pour aller d'une oreille à l'autre.

Ces différences de perception sont exploitées de façon complémentaire par le système auditif et varient selon la fréquence de l'onde sonore.

2.1.1. Rôle de la phase

Il concerne les basses fréquences, inférieures à 800 Hz. Si le son est grave, la longueur d'onde λ est grande ; si elle est supérieure à la distance d entre les deux oreilles, celles-ci ne pourront être en phase, et ce décalage permet au système nerveux central de localiser la source. Dans des

conditions réelles, pour une précision optimale, la longueur d'onde doit être telle que :

$$\frac{\lambda}{2} > d$$

Comme d ≈ 22 cm, cela correspond à une fréquence d'environ 800 Hz. Si le son est aigu, λ est inférieur à la distance d, et les deux oreilles peuvent se retrouver en phase, avec toutefois un décalage de plusieurs périodes. Dans ce cas, le cerveau n'est pas en mesure de localiser la source.

2.1.2. Rôle de l'intensité

Il concerne les hautes fréquences, supérieures à 4000 Hz. C'est ici la différence d'intensité qui intervient. Aux hautes fréquences, l'amortissement de l'onde, d'une oreille à l'autre, est en effet plus important qu'aux basses fréquences. Si la source est complètement latéralisée, l'amortissement entre les deux oreilles peut atteindre :

à 300 Hz : 0 dB à 1000 Hz : 8 dB à 10 000 Hz : 30 dB

La diffraction est d'autant plus importante que la longueur d'onde est petite par rapport à la dimension de la tête.

2.1.3. Rôle du décalage temporel : l'effet Haas

Cela concerne toutes les fréquences. Un décalage temporel existe entre les deux oreilles, qui permet également la localisation, quelle que soit la fréquence de l'onde. L'expérience suivante met en évidence une importante propriété de l'oreille.

On envoie à un sujet muni d'un casque deux impulsions très brèves, deux clics, un dans chaque oreille, séparés par un intervalle de temps Δt :

→ si $\Delta t \geq 2 \cdot 10^{-3}$ s , le sujet entend deux sons, un dans chaque oreille ;

→ si $\Delta t \leq 3 \cdot 10^{-5}$ s , les deux clics fusionnent en un seul, non localisable ;

→ si $2 \cdot 10^{-3}$ s > Δt > $3 \cdot 10^{-5}$ s, le sujet n'entend qu'un son unique, mais dans l'oreille où est arrivé le premier clic.

Ce phénomène fondamental est appelé *loi du premier front d'onde, effet Haas,* ou encore *effet de précédence,* selon les auteurs[1].

Dans la réalité, quand une source est complètement latéralisée, l'intervalle de temps Δt entre les deux oreilles est maximum : sa valeur est alors d'environ $7 \cdot 10^{-4}$ s, c'est-à-dire comprise dans la fourchette de la loi du premier front d'onde. C'est pourquoi nous n'entendons pas deux sons, même très rapprochés, quand la source est située à droite ou à gauche.

Si $\Delta t = 0$, le son est centré. Mais il ressort des valeurs indiquées ci-dessus qu'un léger décentrage, correspondant à seulement 1 cm de différence de trajet pour l'onde incidente, provoque déjà un décalage temporel de $3 \cdot 10^{-5}$ s, donc à la limite de l'effet Haas.

En d'autres termes, si la source n'est pas centrée, les deux oreilles sont pratiquement toujours dans ce cas de figure, et la localisation est possible.

La précision de la localisation est cependant inégale selon l'angle de perception. On admet généralement les valeurs suivantes :

≈ 1° en face ≈ 10° latéralement

D'où le réflexe de regarder dans la direction du son : il s'agit moins de voir que de placer ses deux oreilles à égale distance de la source, pour une précision de localisation optimale.

---

1 Cf. R. Condamines, *Stéréophonie. Cours de relief sonore,* Paris, 1978.

2.2. La localisation verticale

Cette propriété est beaucoup moins précise que la localisation circulaire, et revêt une moindre importance, la plupart des sons étant produits par les hommes eux-mêmes, le plus souvent à leur hauteur.

Elle met probablement en jeu les canaux semi-circulaires, dont la fonction de localisation demeure encore assez mal connue. Peut-être jouent-ils aussi un rôle dans la détection en avant et en arrière de la source (faculté également médiocre, et qui en tout état de cause n'est pas élucidée par la localisation circulaire).

De toute façon, le rôle auxiliaire de la vision semble important pour apprécier l'élévation des sources sonores.

2.3. L'évaluation de la distance

Il s'agit d'une propriété différente des précédentes, et qui n'est pas directement en rapport avec la physiologie du système auditif. Elle est liée à l'expérience, et n'est donc pas innée. Elle s'apprend, et est fonction des informations déjà stockées en mémoire.

D'une façon générale, le cerveau effectue une comparaison entre les sons entendus et des sons de même nature déjà stockés en mémoire : la comparaison porte non seulement sur l'intensité, mais aussi sur le timbre. En effet, entre un son proche et un son lointain, la différence ne se limite pas au niveau : le spectre sonore est modifié par la distance, notamment les composants aigus, qui sont plus absorbés que les graves.

Le système auditif ne peut donc mesurer une distance : même après avoir passé des années à observer des avions en vol, nous ne saurons jamais, si personne ne nous l'apprend, à quelle altitude ils évoluent.

3. L'écoute sélective

Connue également sous le nom d'« effet cocktail », cette faculté nous permet d'isoler une source parmi d'autres dans un ensemble, un instrument précis dans l'orchestre, une voix particulière dans un brouhaha de conversations, et de l'écouter indépendamment des autres.

Cette possibilité est à la base de l'écoute intelligente. Elle est fondamentale dans la perception de l'environnement sonore, et représente la capacité d'extraire de l'information dans un contexte où le niveau du bruit de fond est plus élevé que celui du signal utile.

Une telle propriété est probablement liée à la perception spatiale des sons : l'écoute sélective est beaucoup plus facile dans des conditions naturelles qu'à partir d'une reproduction stéréophonique, et devient presque impossible en monophonie.

La reconnaissance des formes joue également un rôle important : d'une part, il est nettement plus facile de s'attacher à une voix connue, et le timbre aide à la discrimination ; d'autre part, la cohérence de l'information permet de suivre le discours, qu'il soit musical ou parlé. L'écoute a en effet un caractère prévisionnel, et la prévision n'est possible que si l'énoncé est compris.

Mais le cerveau n'est pas seul en cause, et de récents progrès dans la connaissance de l'organe de Corti ont montré que les CCE peuvent modifier localement les propriétés sélectives de la cochlée, « l'accorder » plus ou moins selon les instructions du système nerveux central, et même la préparer, éventuellement, à entendre tel ou tel son.

4. Conclusion

La localisation binauriculaire est une opération très complexe. Les sons réels, composés à la fois de basses et de hautes fréquences, c'est-à-

dire de grave et d'aigu, sont donc localisés par plusieurs procédés simultanément : le fondamental et les premiers composants par différence de phase, les harmoniques de rangs plus élevés par différence d'intensité, et le spectre dans son ensemble par différence de temps.

Les obstacles se trouvant inévitablement dans le champ de propagation de l'onde viennent encore compliquer l'opération en la perturbant. Ils obligent le système nerveux à discriminer les sons directs et leurs réflexions, à identifier la direction réelle de la source.

De plus, la localisation d'une source utile ne s'effectue jamais dans le silence complet. Le bruit de fond, plus ou moins important, est un facteur de gêne s'ajoutant au signal et pouvant brouiller sa détection. Le nombre de paramètres traités par le système nerveux central en quelques millisecondes, et la finesse des éléments comparés laissent rêveur...

La localisation binauriculaire, pratiquée en permanence par chaque individu — le plus souvent inconsciemment — permet, en coordination avec les autres activités sensorielles, de prendre conscience de notre environnement, de le structurer et de l'intégrer en une image mentale.

CHAPITRE X

INTRODUCTION A LA PSYCHOACOUSTIQUE

1. Introduction

1.1. Principes de la psychoacoustique

Si le système auditif se comportait comme un appareil de mesures physiques en laboratoire, si la perception humaine correspondait aux résultats lus sur des cadrans gradués, ou exprimés par des courbes et des diagrammes, la psychoacoustique n'existerait pas.

Il existe en effet des divergences entre ce que l'on mesure et ce que l'on perçoit : le subjectif ne se laisse pas parfaitement décrire par l'objectif, et il est difficile, sinon impossible, de fournir une description mathématique de nos sensations, ou simplement de prévoir avec précision les réactions de notre système auditif.

L'expérimentation demeure donc une nécessité. Mais avec quoi expérimenter ? Avec quel genre de sons ?

La tentation est forte d'utiliser des *artefacts*, c'est-à-dire des sons artificiels, engendrés par des générateurs électroniques, bien contrôlés, aisément calibrables, faciles à (re)produire ; mais de tels sons n'ont pas de réalité musicale, et apparaissent surtout beaucoup trop simples. Des

expériences se limitant à ces artefacts ne pourraient rendre compte de toute la complexité de l'audition. Il n'est cependant pas toujours possible de les éviter, et l'interprétation des résultats, dans ces situations, doit tenir compte de leur nature artificielle.

1.2. Domaine de la psychoacoustique

La psychoacoustique étudie la perception auditive sous l'angle des quatre paramètres sonores fondamentaux : la hauteur, la durée, le timbre, et l'intensité, cités ici par ordre d'apparition historique dans la notation musicale.

La **hauteur** a d'abord été notée seule, dans les systèmes littéraux (c'est-à-dire à base de lettres) ; les **durées** sont apparues avec les notations neumatiques. Ces deux paramètres sont les plus importants : au Moyen Age, surtout à partir du XIII^{ème} siècle, l'écriture atteint déjà une grande précision, et des progrès concernant le rythme (démultiplication des figures longues en valeurs de plus en plus brèves) interviennent encore au XIV^{ème} siècle.

Le **timbre** est en rapport avec l'instrumentation. Celle-ci n'est pratiquement jamais précisée avant le début du XVII^{ème} siècle.

Giovanni Gabrielli apparaît comme un précurseur lorsque dans ses *Sacræ Symphoniæ* (1597), il demande une instrumentation précise et fournit des indications de nuances. A l'inverse, François Couperin publie en 1714 des *Concerts royaux l'usage de toutes sortes d'instruments de musique*, et Jean-Marie Leclair, pour son *Concerto op. 7 n° 3* (1737), offre la possibilité de la flûte, du violon ou du hautbois. On sait que Jean-Sébastien Bach lui-même ne précisait pas toujours son instrumentation ou laissait le choix du soliste.

L'**intensité** concerne les nuances et la dynamique. Aucune indication n'est fournie dans les partitions probablement avant 1517, date

de parution de la *Tablature de luth* de Vincenzo Capirola où figure la mention « *tocca pian piano* ». A la fin du XVI^{ème} siècle, *piano* et *forte* sont notés en toutes lettres ; les premières abréviations figurent peut-être dans la *Partitura di Madrigali* de Domenico Mazzochi (1638).

Au XVIII^{ème} siècle, la situation reste encore variable, et si Bach donne peu d'indications, Rameau, en revanche, se veut assez précis. Dès la fin du siècle, les *crescendo* et *decrescendo* sont notés dans les partitions symphoniques, sous l'influence de l'École de Mannheim.

Les nuances musicales s'affinent naturellement au XIX^{ème} siècle : le *ppp* fait son apparition dans la *Sonate Waldstein* op. 53 (1804) de Beethoven, et le *fff* dans la *Symphonie fantastique* (1830) d'Hector Berlioz.

Dans la musique contemporaine, la dynamique fait intégralement partie du matériau sonore, au même titre que le timbre ou la hauteur.

2. Les logarithmes

Ils revêtent une importance fondamentale en acoustique, car l'audition des paramètres musicaux, comme d'ailleurs presque toute la perception sensorielle, suit en grande partie une allure logarithmique.

2.1. Définition

On appelle progression une suite de nombres dont chacun est relié au précédent par une loi ou « raison ». Une progression géométrique signifie que la loi est la multiplication ; la raison d'une progression arithmétique est la loi d'addition.

Considérons tout d'abord une progression géométrique de raison 10 commençant par 1 :

1	10	100	1000	10 000	100 000

Chaque nombre est bien égal au terme précédent multiplié par 10. Nous pouvons également exprimer chacun des termes de la progression par une puissance de 10 :

10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5

Considérons maintenant une progression arithmétique de raison 1 commençant par 0 :

0 1 2 3 4 5

Faisons enfin coincider les deux progressions à partir de leur origine ; appelons N la progression géométrique, L la progression arithmétique, et traçons une demi-droite correspondant à ces divisions :

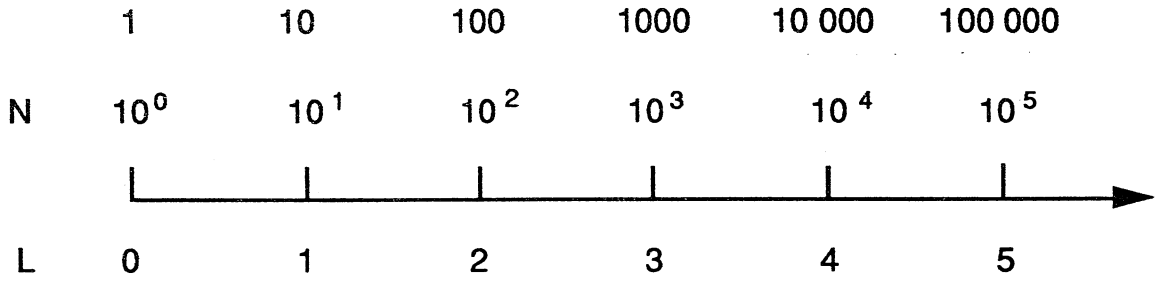


Fig. 57 : progression logarithmique

On écrit par convention :

$$\log 1 = \log 10^0 = 0$$
$$\log 10 = \log 10^1 = 1$$
$$\log 100 = \log 10^2 = 2$$

Le logarithme d'un nombre N est donc celui qui lui correspond sur la ligne L (fig. 57). Nous constatons également que l'exposant d'une puissance de 10 exprime son logarithme. Ex. : $\log 10^{1,3} = 1,3$

En généralisant cette propriété, nous écrirons :

$$N = 10^L \qquad (37)$$

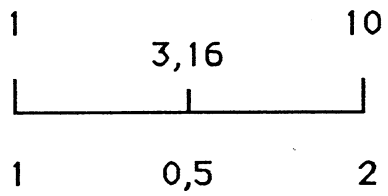
Du fait que la progression N est de raison 10, ces logarithmes sont appelés décimaux (ou vulgaires). Il en existe d'autres sortes, notamment les logarithmes népériens, mais nous n'utiliserons pratiquement que ceux-là.

Nous remarquons que le rapport entre la demi-droite et la ligne L est simple : à des longueurs de segments égaux correspondent des intervalles numériques égaux (puisque la progression est arithmétique). Il en va autrement pour la ligne N : le premier segment comprend les nombres 1 à 9, le deuxième 10 à 99, le troisième 100 à 999, etc. Les nombres de la série N correspondent à des longueurs de plus en plus petites.

Exemple : à quel nombre N correspond 0,5 sur la ligne L ? En d'autres termes, quel nombre a 0,5 pour logarithme ?

Appliquons la relation 37 :

$$N = 10^{0,5} = 10^{1/2} = \sqrt{10} = 3,16$$



Comme le montre le schéma ci-dessus, la valeur 0,5 se place entre 1 et 2 pour la ligne L ; mais du fait que les divisions sont de plus en plus petites pour la ligne N, on ne peut y localiser un nombre, hormis les puissances de 10, que par le calcul. L'exemple proposé permet donc d'écrire :

$$\log 3,16 = 0,5$$

Fort heureusement, les tables de logarithmes, les règles à calcul (aujourd'hui obsolètes) et les calculatrices fournissent ces résultats tout

prêts, et il est facile de connaître le logarithme, ou correspondant sur la ligne L, de n'importe quel nombre N.

2.2. L'expression logarithmique

Observons les valeurs suivantes :

$$\log 2 = 0{,}301$$
$$\log 20 = 1{,}301$$
$$\log 200 = 2{,}301$$

Nous remarquons qu'un logarithme se compose de deux parties distinctes : une à droite de la virgule, appelée *mantisse*, qui ne varie pas lorsque le nombre N est multiplié par 10 ou par une puissance de 10 ; l'autre partie, à gauche de la virgule, est appelée *caractéristique* et varie en fonction de N : elle est égale au nombre de chiffres constituant N, moins 1. On comprend pourquoi en examinant la figure 57 : le nombre 150, par exemple, possède 3 chiffres, la caractéristique de son logarithme vaut donc 3 – 1 = 2, comme pour tous les nombres situés entre 100 et 1000. Le décalage vient de ce que la série N commence par 1 et la série L par 0.

2.3. Propriétés opératoires

Les logarithmes permettent, le cas échéant, de simplifier les calculs. Voici brièvement rappelées quelques équivalences bien connues :

$$\log A \times B = \log A + \log B \qquad (38)$$

$$\log \frac{A}{B} = \log A - \log B \qquad (39)$$

$$\log \sqrt[n]{a} = \frac{\log A}{n} \qquad (40)$$

$$\log A^n = n \log A \qquad (41)$$

Exemple : soit à trouver le logarithme de 5 :

$$\log 5 = \log \frac{10}{2} = \log 10 - \log 2$$

$$= 1 - 0{,}3 = \boxed{0{,}7}$$

On peut démontrer de la sorte que les nombres inférieurs à 1 ont un logarithme négatif :

$$\log 0{,}2 = \log (2 \times 10^{-1}) = \log 2 + \log 10^{-1}$$

$$= 0{,}301 - 1 = -0{,}699$$

Les logarithmes sont très utiles lorsque la grandeur des phénomènes est considérable. Par exemple, dans certaines conditions, l'écart entre les sons les plus faibles perçus par l'oreille et les sons les plus forts peut être de 1 à cent mille milliards, soit 1 à 100 000 000 000 000... Il est préférable d'exprimer ce rapport sous forme logarithmique, et d'utiliser une échelle plus comprimée, variant en l'occurrence de 0 à 14.

2.4. Le Bel et le décibel

Nous avons vu que la distance logarithmique était identique entre 1 et 10, 10 et 100, 100 et 1000, ..., et chaque fois égale à log 10 = 1.

Par convention, ce gain de 1 (log 10) est considéré comme l'unité, et appelé Bel (symbolisé B). Cette valeur de 1 B représente donc le gain d'intensité quand le rapport des sources est égal à 10. Par exemple :

$$\log \frac{10000}{1000} = \log \frac{10^4}{10^3} = 1\,\text{B}$$

Le Bel exprime donc un rapport d'intensité décrit par son logarithme : un rapport de 10 à 1000 représente un gain de :

$$\frac{1000}{10} = 100$$

$$\log 100 = 2\,\text{B}$$

Entre 1 et 20 violons, le gain est de :

$$\log 20 = 1{,}3 \text{ B}$$

D'une façon générale, nous dirons que le niveau L d'intensité en Bels est égal à :

$$L_B = \log \frac{I_2}{I_1} \qquad (42)$$

où I_1 est la puissance initiale, et I_2 la puissance finale.

Le Bel est une unité peu maniable, parce que trop grande ; c'est pourquoi, dans la pratique, on le subdivise en utilisant sa $10^{ème}$ partie, le décibel, symbolisé dB.

$$1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$$

L'équation 42 devient alors :

$$L = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \qquad (43)$$

2.5. Niveau de référence : la valeur 0 dB

Jusqu'à présent, nous avons comparé des intensités entre elles et évalué le gain résultant de leur augmentation. Mais comment mesurer un gain à partir d'une source initiale ? Par exemple, un violon joue dans une salle ; il représente l'intensité finale I_2. Que vaut I_1 dans ce cas de figure ?

Il est indispensable de définir un référence, un point de départ pour graduer une échelle de gain et pouvoir effectuer des calculs.

Par convention, on appelle 0 dB la puissance minimale nécessaire pour qu'un son de 1000 Hz soit statistiquement tout juste audible. Cette intensité mesurée est égale à :

$$10^{-12} \text{ watts/m}^2$$

La formule 43 s'écrit donc :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (44)$$

avec I l'intensité finale, ou totale, et I_0 l'intensité de référence égale à 10^{-12} watts/m^2.

En pratique, il est difficile de mesurer l'intensité d'une onde sonore, c'est-à-dire l'énergie traversant des couches d'air successives considérées comme unités de surface (cf. p. 58). Il est beaucoup plus facile d'obtenir la valeur de la pression, exercée par exemple sur la membrane d'un microphone. La pression minimale nécessaire à l'audition d'un son de 1000 Hz, équivalant à une intensité de 10^{-12} w/m^2, est égale à :

$2 \cdot 10^{-5}$ Pascals (20 µPa)

Sachant que l'intensité d'une onde est comme le carré de la pression qu'elle exerce, le niveau de pression en décibels L_p devient, en fonction de l'équation 44 :

$$10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)^2 = 10 \times 2 \times \log \frac{I}{I_0}$$

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \qquad (45)$$

Le niveau 0 B (ou 0 dB) est donc la valeur au-dessous de laquelle un sujet statistiquement normal n'entend pas un son de 1000 Hz. Mais il est tout à fait possible, pour une ouïe plus fine que la normale, d'entendre cette hauteur au-dessous de 0 dB. Cela n'a rien d'exceptionnel. D'ailleurs, l'oreille humaine présente à 3700 Hz une acuité plus fine de 8 dB en moyenne qu'à 1000 Hz.

2.6. Applications numériques

1) Quelle est l'intensité acoustique d'un son de 40 dB ?

40 dB = 4 B, soit un rapport de puissance de 1 à 10^4 par rapport au niveau de référence :

$$10^{-12} \times 10^4 = \boxed{10^{-8}\ \text{w/m}^2}$$

2) Quel est le niveau en décibels d'une trompette développant une intensité acoustique de $4 \cdot 10^{-3}$ w/m² ?

En application de la formule 44, nous posons :

$$L = 10 \log 4 + 10 \log \frac{10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$= 10 \log 4 + 10 \log 10^9$$

$$= 6 + 90 = \boxed{96\ \text{dB}}$$

3) Quel niveau de pression sonore correspond à 64 dB ? (L_p)

Cherchons d'abord le logarithme du facteur représentant l'accroissement de P_0 ; les intensités étant égales au carré des pressions, nous posons :

$$\frac{64}{20} = 3{,}2$$

Transformons maintenant cette valeur logarithmique en nombre N :

$$N = 10^L = 10^{3,2} = 1584{,}9$$

ce qui permet de calculer l'accroissement de pression à partir du niveau de référence :

$$1584{,}9 \times 2 \cdot 10^{-5} = \boxed{3{,}17 \cdot 10^{-2}\ \text{Pa}}$$

Les calculs ci-dessus mettent en évidence la formule générale permettant de transformer un niveau d'intensité exprimé en décibels en une valeur de pression en pascals :

$$p = 10^{L/20} \times p_0 = \left(\sqrt[20]{10}\right)^L \times p_0 \qquad (46)$$

On remarque que cette formule ne contient qu'une seule variable, L. Il est donc possible d'exprimer numériquement la racine 20ème de 10 et p_0 qui sont des constantes :

$$p = (1{,}122)^L \times 2 \cdot 10^{-5}$$

2.7. L'addition des niveaux en décibels

Il ressort de la formule 44 qu'un doublement de l'intensité sonore équivaut toujours à un gain de 3 dB. En effet :

$$10 \log \frac{2I}{I} = 10 \log 2 = 3 \text{ dB}$$

En conséquence :

$$20 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = 23 \text{ dB}$$

$$60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 63 \text{ dB}$$

etc.

Le même doublement exprimé en niveau de pression donnera :

$$20 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = 26 \text{ dB}$$

$$60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 66 \text{ dB}$$

puisque : $$20 \log \frac{2p}{p} = 20 \log 2 = 6 \text{ dB}$$

Cela signifie que le fait d'ajouter 20 dB aux 20 dB d'origine augmente le niveau d'intensité de 3 dB et le niveau de pression de 6 dB.

Le gain obtenu en ajoutant deux intensités égales est donc faible, et d'autant plus lorsque les intensités sont différentes. Dans ce cas, la plus petite devient vite négligeable par rapport à la plus grande. Soit par exemple trois niveaux d'intensité, respectivement 78 dB, 74 dB, et 71 dB. Leur somme se calcule ainsi :

$$10^0 + 10^{-0{,}4} + 10^{-0{,}7} = 1{,}6$$

$$10 \log 1{,}6 = 2$$

$$78 + 2 = 80 \text{ dB}$$

La première ligne convertit en nombres N, selon la relation 37, les différences exprimées en décibels existant entre les trois sons ; 10^0 signifie qu'il n'y a (évidemment) pas de différence entre la première valeur et elle-même ; les autres intensités sont comparées à la plus forte : – 4 dB pour le deuxième, – 7 dB pour le troisième. Cette démonstration s'applique bien entendu au cas du doublement de la source. Soit par exemple l'addition de deux sons de 75 dB chacun :

$$10 \log (10^0 + 10^0) = 10 \log 2 = 3$$

$$75 + 3 = 78 \text{ dB}$$

CHAPITRE XI

LA SENSATION DE NIVEAU

1. Mesure de la sensation de niveau

1.1. Loi des seuils de Weber

Au XIX^{ème} siècle, Ernst Heinrich Weber (1795-1878) fut un des pionniers de la psychophysiologie sensorielle. Il s'intéressa particulièrement aux seuils de perception différentielle, c'est-à-dire aux différences d'intensité nécessaires entre deux stimulations pour qu'une différence entre elles soit perçue.

Après de nombreuses expériences, il énonça un théorème dit *loi de Weber*, ainsi formulé :

"la plus petite augmentation de stimulus capable de provoquer un accroissement de sensation est une fraction constante du stimulus précédemment appliqué".

Weber avait d'abord étudié le toucher et la sensation de poids : lorsqu'on tient un certain poids dans la main, combien faut-il ajouter pour obtenir la sensation de poids immédiatement supérieure ?

Environ 5%, soit 1/20ème du poids initial. Pour 100 g (I), il faut ajouter 5 g (ΔI), pour 500 g, 25 g, et pour 1 kg, 50 g. Nous obtenons donc le rapport constant :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{5}{100} = \frac{25}{500} = \frac{50}{1000} = 0{,}05$$

1.2. Loi de Fechner

Les résultats obtenus par Weber dans le domaine de l'intensité sonore n'ont pas été probants, et c'est à un autre savant allemand, Gustav Theodor Fechner (1801-1887), que revient le mérite d'avoir découvert une loi, sinon rigoureusement juste, qui fournit du moins des données valables en première approximation. La loi de Fechner énonce que *"la sensation varie comme le logarithme de l'excitation"*.

Cette loi a une portée générale, et s'applique à toutes nos perceptions sensorielles — de façon plus ou moins régulière — à la vision comme au goût, quoique pour celui-ci une mesure chiffrée soit difficile à obtenir, et dépende encore plus largement des facteurs subjectifs.

1.3. Application

D'après la loi de Fechner, lorsque l'intensité d'un stimulus augmente selon une progression géométrique, la sensation correspondante n'augmente pas d'autant, mais seulement selon une progression arithmétique.

Par exemple, soient 10 choristes : si 8 autres choristes viennent s'ajouter aux précédents, nous aurons un accroissement de stimulation de 10 à 18, soit le rapport :

$$\frac{18}{10} = 1{,}8$$

La sensation d'intensité n'augmentera que du logarithme de cette valeur, c'est-à-dire :

$$\log 1{,}8 = 0{,}25$$

De même, quand une source est doublée, le gain d'intensité est constant, quelle que soit la valeur de cette source. Par exemple :

$$20 + 20$$

$$30 + 30$$

$$40 + 40$$

représentent le même rapport d'excitation (40/20, 60/30, 80/40), c'est-à-dire 2 ; le gain de sensation est toujours le même, à savoir :

$$\log 2 = 0{,}3$$

2. Le champ auditif humain

L'oreille est limitée, pour sa perception des hauteurs, dans le grave et dans l'aigu, et pour l'intensité, par les sons trop faibles ou trop forts pour donner lieu à une sensation auditive. Ces limites déterminent un ensemble, le champ auditif humain, à l'intérieur duquel n'importe quelle fréquence pourra être entendue.

2.1. Le diagramme de Wegel

Ce diagramme trace les contours du champ auditif humain (fig. 58). Il montre que le système auditif n'est pas un capteur linéaire, c'est-à-dire qu'il n'entend pas et ne transmet pas au cerveau les fréquences qu'il perçoit avec la même intensité.

2.1.1. Limites et courbes des seuils

La limite inférieure, ou courbe du seuil de perception, délimite le niveau au-dessous duquel un son est trop faible pour être entendu. Cette courbe est considérablement relevée pour les graves comme pour les aigus : un son de 50 Hz est perçu au seuil d'audibilité à 60 dB environ, alors que moins de 20 dB sont nécessaires pour 200 Hz, et par définition 0 dB pour 1000 Hz.

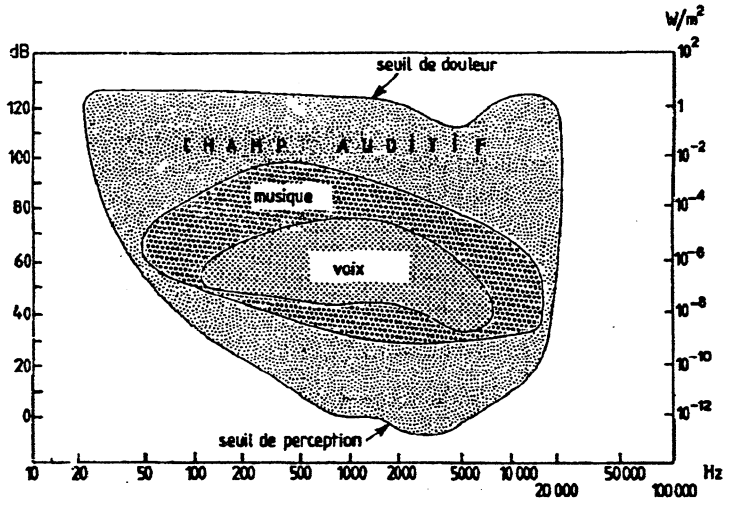


Fig. 58 : le champ auditif humain

La limite supérieure indique l'intensité partir de laquelle un son devient douloureux. Cette courbe est presque plate, comparée à celle du seuil d'audibilité. Cela signifie qu'à partir de 120 dB environ, tout son devient douloureux et même dangereux.

Pour les hauteurs, ce diagramme montre aussi qu'une oreille statistiquement normale entend dans le meilleur des cas de 16 Hz à 20 000 Hz environ. Les fréquences inférieures à 16 Hz sont des infrasons, au-delà de 20 000 Hz commence le domaine des ultrasons.

Il possible de faire figurer, à l'intérieur de champ auditif, différents sous-ensembles correspondants à des activités sonores particulières (parole, musique, etc...).

2.1.2. La zone sensible de l'oreille

La courbe du seuil d'audibilité met en évidence que l'oreille a besoin de très peu d'énergie pour entendre certains sons. On appelle *zone sensible de l'oreille* (ZSO) les fréquences comprises, au sens large, entre 500 et 5000 Hz, et plus spécialement l'octave comprise entre 2000 et 4000 Hz.

Les conséquences musicales de cette propriété auditive sont nombreuses, et ont été largement exploitées dans certains domaines, comme la lutherie par exemple. C'est également dans la ZSO que la marge entre les sons faibles et les sons forts (la dynamique) est la plus étendue : le seuil de douleur y représente une puissance mille milliards de fois supérieure à celle du seuil d'audibilité... (d'où l'intérêt d'utiliser les décibels, c'est-à-dire une échelle logarithmique).

2.2. Le diagramme de Fletcher

Le diagramme de Wegel donne des renseignements sur les seuils, sur les limites de l'audition, mais ne fournit pas d'indications sur le comportement de l'oreille à l'intérieur du champ auditif, et donc sur l'évolution de la sensation avec l'augmentation de l'intensité. C'est précisément ce point qu'éclaire le diagramme de Fletcher (fig. 59).

2.2.1. Les courbes isosoniques

Tout d'abord, observons comment se construit ce diagramme. On fait entendre à un sujet un son de 1000 Hz, qui sera la fréquence de référence, à une intensité de 40 dB : on lui présente ensuite d'autres sons à d'autres hauteurs, qu'il doit régler subjectivement à la même intensité que celle de la référence, soit à 40 dB ; on note soigneusement à quels niveaux réels, en décibels, le sujet a réglé les différents sons, et ces valeurs sont portées sur

un diagramme identique à celui de Wegel. Tous ces points sont enfin reliés entre eux : sur la courbe obtenue, figurent donc tous les sons qui, subjectivement, sonnent aussi fort que 1000 Hz à 40 dB.

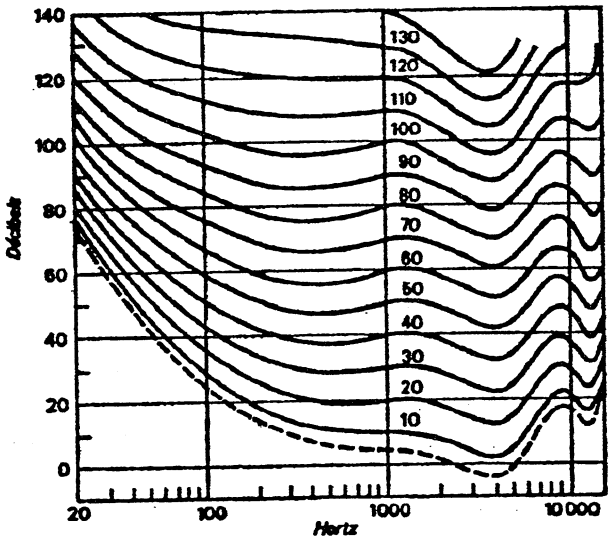


Fig. 59 : le diagramme de Fletcher

Les sons ainsi repérés étant tous perçus au même niveau, la courbe est appelée courbe isosonique ; tous les sons de la courbe ont la même *sonie*, c'est-à-dire la même intensité subjective.

L'expérience est poursuivie en prenant tour à tour la référence 1000 Hz à toutes les valeurs d'intensité de 10 en 10 dB, auxquelles sont comparées un échantillon d'autres fréquences, de 20 à 20 000 Hz. On obtient ainsi une série de courbes isosoniques, échelonnées par 10 dB (fig. 59).

2.2.2. Mesure de la sonie : le phone

Tous les sons d'une courbe isosonique ont des intensités physiques différentes, mesurées en décibels, mais des intensités subjectives égales, c'est-à-dire une même sonie. Il est donc possible de définir une unité

d'intensité subjective, l'unité de sonie : c'est le phone, symbolisé Ph. A 1000 Hz, par définition, l'intensité physique et la sonie sont égales, puisque tous les sons ont été comparés à cette fréquence-étalon.

On pose donc :

1 Ph = 1 dB à 1000 Hz

Ainsi, un son de 1000 Hz à 50 dB possède forcément une sonie de 50 Ph, mais à 100 Hz, 50 Ph représentent 60 dB, comme on peut le constater sur la figure 58. De même, 60 dB est l'énergie nécessaire pour obtenir tout juste 0 Ph à 20 Hz.

2.2.3. La non-linéarité de l'audition

L'examen des courbes isosoniques confirme la non-linéarité du système auditif, et les variations de son comportement en fonction de l'intensité et de la fréquence des sons entendus.

Les courbes se redressent au fur et à mesure que l'intensité augmente, et à partir de 100 Ph, le niveau perçu se rapproche du niveau physique. Il est d'ailleurs normal que les courbes de Fletcher ressemblent de plus en plus à celle du seuil de douleur de Wegel.

Dans la ZSO, les courbes isosoniques restent à peu près parallèles, ce qui n'est pas le cas aux extrêmes du spectre (sur le diagramme, les hautes fréquences ne sont pas représentées). L'intervalle entre deux échelons est plus court aux faibles intensités qu'aux fortes. La dynamique auditive, c'est-à-dire le rapport entre les intensités extrêmes, est plus petite, plus ramassée dans le grave que dans la ZSO ; l'oreille y est moins sensible aux nuances, les échelons de sensations sont plus proches les uns des autres : la sonie croît plus vite aux fréquences extrêmes que dans la zone sensible. Ceci explique pourquoi il est plus facile d'apprécier de subtiles variations d'intensité sur un violon que sur une contrebasse.

Le relèvement des courbes isosoniques de part et d'autre de la ZSO est responsable d'une interférence entre le timbre et le niveau sonore. En effet, considérons une chaîne hi-fi diffusant de la musique à un niveau de 90 dB. Si l'on baisse le son de 50 dB, en agissant sur le potentiomètre de volume, le niveau de reproduction tombe à 40 dB : en conséquence, toutes les fréquences nécessitant plus que cette valeur pour se trouver au-dessus du seuil d'audibilité disparaissent du spectre sonore, qui se trouve ainsi amputé de ses composants graves et aigus, et dont le timbre s'appauvrit de façon non négligeable.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle est prévu, sur certains préamplificateurs, un filtre actif souvent appelé *loudness*, et dont la fonction est de relever artificiellement, aux bas niveaux d'écoute, l'intensité des fréquences extrêmes du spectre sonore.

2.2.4. Dynamique et nuances musicales

Les propriétés de l'oreille mises en évidence par le diagramme de Fletcher permettent de mieux comprendre le problème des nuances en musique, et particulièrement le rapport entre ce qui est écrit sur la partition et ce qui est effectivement joué.

Dans une salle de concert, où le silence n'est jamais total, le bruit de fond atteint environ 40 dB ; sachant qu'un *fortissimo* dépasse rarement 110 dB, la dynamique pratique (ou rapport signal/bruit) de la salle est dans ces conditions de 70 dB.

Par ailleurs, la notation de l'intensité utilise couramment une échelle allant du *ppp* au *fff* en passant par le *mf*, ce qui représente 7 échelons d'intensité. Cette échelle recouvre parfaitement le rapport S/B de la salle, les 7 nuances correspondant aux 7 Bels de dynamique.

Attention toutefois à ne pas commettre de contresens : l'écart séparant deux nuances voisines est effectivement de 1 Bel, et l'expérience

montre que 10 dB correspondent bien à la plus petite valeur moyenne contrôlable par un musicien en situation de jeu (et non d'expérimentation). Mais, d'une part, cela ne signifie pas que l'oreille ne puisse apprécier des variations de niveau plus petites : dans les meilleures conditions, il est possible d'entendre une différence de 1 dB entre deux sons. Toutefois cet écart est beaucoup trop étroit pour être produit volontairement et contrôlé par un instrumentiste.

D'autre part, le fait que les nuances correspondent aux 70 dB de dynamique n'implique pas une coïncidence terme à terme des deux échelles : un *pp* n'est pas forcément égal à 50 dB, ou un *forte* à 90 dB, comme nous le verrons plus loin. Il ne faut surtout pas confondre rapport d'intensité et valeur absolue.

Enfin, que l'écriture de l'intensité dépasse parfois 7 échelons, notamment dans la musique contemporaine, ne remet pas en question ce qui vient d'être exposé. D'abord parce qu'une nuance de plus ou de moins ne change pas grand chose à sa valeur ; mais surtout parce qu'il n'est pas évident que les possibilités pratiques des interprètes s'accroissent avec l'extension de l'écriture, et qu'un *ppppp* représente réellement deux échelons de moins qu'un *ppp*. Ces notations n'en ont pas moins leur utilité, et agissent forcément sur le comportement des instrumentistes.

3. Facteurs modifiant la perception de l'intensité

Les caractéristiques générales de la perception de l'intensité sont le plus souvent déduites de données moyennes, obtenues statistiquement, sans tenir compte des facteurs individuels pouvant modifier les performances du système auditif. Ces éléments impondérables ne doivent cependant pas être négligés, car ils éclairent les comportements auditifs individuels.

3.1. La prévisibilité des événements sonores

La prévisibilité est la faculté qui permet au système auditif de s'adapter à l'intensité des signaux sonores. L'opération est effectuée par les muscles de l'oreille moyenne, qui modifient, sur ordre du cerveau, le plus souvent par voie réflexe, le niveau transmis à l'oreille interne.

Cette régulation est une activité permanente, conditionnée par la structure sonore de l'environnement. Les muscles ossiculaires, par leur contraction, protègent l'oreille interne des intensités pouvant l'endommager ou simplement provoquer la gêne ou la douleur.

Mais surtout, l'adaptation à chaque instant du niveau sonore apparaît comme une nécessité pour le système nerveux central, qui utilise toutes sortes de radars et de détecteurs pour prévoir l'intensité immédiate, comme la vision (nous *voyons* qu'une porte va claquer) ou la conscience de la situation (le spectacle terminé, nous *savons* que le public va applaudir).

Ce servo-réglage de l'intensité est tout à fait comparable à l'action de la pupille de l'œil pour la lumière. Mais la conséquence d'un tel dispositif est que, contrairement à ce qui se passe pour la hauteur, il ne peut exister aucune référence fixe du niveau sonore : l'oreille absolue n'existe pas pour l'intensité, personne ne peut à coup sûr évaluer un niveau en décibels ou en phones. Il faudrait pour cela connaître à tout moment l'état de contraction de sa musculature auriculaire, ce qui est évidemment impossible.

C'est la raison pour laquelle la tentative d'introduire un appareil de mesure, le décibelmètre, dans la pratique musicale s'est soldée par un échec. Cette idée un peu étrange fut cependant, voici quelques dizaines d'années, défendue par un chef d'orchestre prestigieux, Léopold Stokowski, alors directeur de l'Orchestre Philharmonique de New York.

Il imagina d'affecter chaque nuance d'une valeur absolue, du *ppp* à 20 phones au *fff* à 95 phones, et d'en contrôler soigneusement la valeur en cours d'exécution grâce à un décibelmètre posé sur son pupitre. Personne ne fut satisfait des résultats, à commencer par lui-même sans doute. Faut-il s'en étonner ? Non, bien sûr. A cause du phénomène de prévisibilité, la valeur d'une nuance dépend du contexte musical, et deux *forte* identiques seront perçus différemment selon qu'ils sont précédés d'un *pp* ou d'un *ff*.

3.2. Altérations de l'audition

En dehors du phénomène normal de régulation et d'adaptation de l'intensité sonore, toute les altérations ou affections de l'audition, temporaires ou définitives, sont bien entendu des facteurs à prendre en compte pour l'étude du comportement auditif individuel. C'est ici le domaine de l'hypoacousie, de la surdité au sens le plus large du terme, et qui fera l'objet d'une étude à part (au chapitre suivant).

CHAPITRE XII

LA SURDITÉ

Dans son acception la plus générale, la surdité peut être définie comme *"toute élévation du seuil de perception"*. Une élévation de ce seuil pour un son quelconque signifie qu'il lui faut plus de puissance pour être entendu. Il est donc préférable de parler d'hypoacousie plutôt que de surdité, qui pourrait laisser croire à une absence totale d'audition.

1. L'audiogramme tonal

1.1. Présentation

Pour comprendre la surdité et pouvoir la combattre, il faut bien la connaître, et être capable de la dépister et de la mesurer. Il existe pour cela un test simple et efficace, au moins dans une première approche, l'audiogramme tonal par conduction aérienne (ou tout simplement audiogramme), réalisé par un appareil appelé audiomètre.

Le patient est muni d'un casque d'écoute, et ses deux oreilles sont testées séparément. L'opérateur lui propose des sons (généralement sinusoïdaux) dont il augmente progressivement l'intensité. Dès que le patient les entend, il appuie sur un bouton ou fait un signe ; ces valeurs

sont chaque fois reportées sur un diagramme comportant la fréquence en abscisse, et les gains ou pertes exprimés en décibels par rapport à un axe de référence en ordonnée (cf. fig. 60). Les fréquences s'échelonnent le plus souvent en octaves, de 125 à 8000 Hz, mais des valeurs intermédiaires peuvent également être utilisées.

Le seuil d'audibilité pour chaque oreille est ainsi établi. L'audiogramme révèle les éventuelles déficiences auditives et aide au diagnostic. Il apprend également que, chez un sujet normal, les deux oreilles entendent rarement de façon identique, et que les courbes ne se confondent pratiquement jamais avec l'axe de référence.

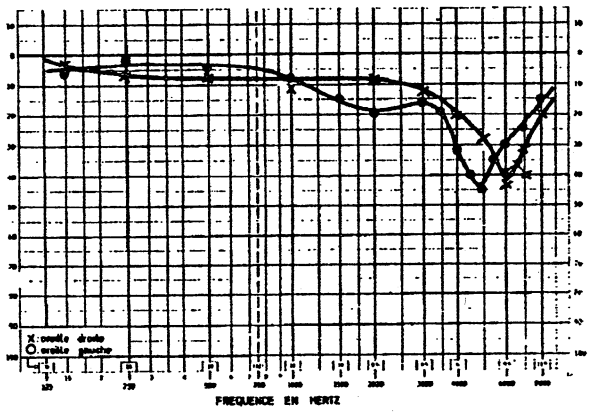


Fig. 60 : l'audiogramme tonal

1.2. Le niveau de référence

Sur un audiogramme, les écarts par rapport l'axe de référence sont évalués en décibels, par échelon de 5 dB. Cet axe de référence est noté 0. Cela ne signifie pas 0 dB, car alors, ne pas entendre les basses et les hautes fréquences à ce niveau serait tout à fait normal, et exprimer des déficits de 15 ou 20 dB pour une oreille saine n'aurait guère de sens. Cet axe de référence n'est autre que la courbe 0 Ph du diagramme de Wegel, c'est-à-dire le seuil d'audibilité statistiquement normal. Ainsi,

l'audiomètre, réglé sur 0 à la fréquence 125 Hz délivre un signal de 40 dB environ, comme on peut le constater en se reportant à la figure 62.

2. Les différents types de surdité

2.1. Les surdités temporaires

Les surdités temporaires sont celles qui disparaissent d'elles-mêmes, sans intervention thérapeutique. Nous en distinguerons deux types principaux, les surdités dues à la fatigue, et les surdités accidentelles.

2.1.1. La fatigue auditive

Elle peut durer de quelques secondes à plusieurs dizaines d'heures, et se traduit aussi bien par une diminution temporaire de l'acuité auditive que par l'abaissement du seuil de douleur (les sons deviennent plus facilement douloureux).

Dans le premier cas, la fatigue est plutôt d'ordre neurologique, et concerne les centres nerveux de l'audition ; dans le second cas, c'est la musculature de l'oreille moyenne qui est généralement touchée.

2.1.2. Mesure de la fatigue auditive

Comment mesurer la fatigue ? Par le temps nécessaire à la récupération d'une audition normale.

C'est le principe du *test de Peyser* : on diffuse à un sujet muni d'un casque un son de 1000 Hz, à 10 dB, pendant 3 minutes ; après 15 s de repos, on mesure son seuil d'audition à 1000 Hz : s'il est plus élevé de 5 dB que d'habitude, c'est normal ; si le déficit est supérieur à 10 dB ou plus, la mesure est recommencée de 30 s en 30 s jusqu'au retour à la normale. Il

est évident que plus le temps de récupération est long, plus l'oreille est fatigable.

L'oreille ne se fatigue pas uniformément sur toute l'aire audible. C'est la ZSO qui est la plus fragile, et atteinte d'autant plus profondément que la fréquence excitatrice est proche de cette zone. D'ailleurs, plus la bande de fréquence excitatrice est étroite, plus ses effets sont sensibles sur le seuil d'audition : un bruit blanc est moins dangereux, à intensité physique égale, qu'un son sinusoïdal.

La fatigue musculaire ne se mesure pas précisément, mais ses effets se font sentir sur la dynamique auditive. Après avoir été soumis longtemps à un milieu bruyant, les muscles ossiculaires, qui se sont beaucoup contractés pour protéger l'oreille interne, sont fatigués, et des sons même peu intenses — les contraignant néanmoins à un nouvel effort — peuvent être ressentis douloureusement. Il en résulte un abaissement du seuil supérieur tolérable, réduisant d'autant la dynamique auditive.

2.1.3. Les surdités accidentelles

Il existe des facteurs qui peuvent intervenir temporairement sur l'acuité auditive. Certaines affections du nez ou de la gorge, ou certains médicaments, occasionnent parfois des baisses de l'audition, normalement passagères.

2.2. La surdité de transmission

Ce type de surdité intéresse le système de transmission du son, c'est-à-dire l'oreille externe et l'oreille moyenne.

2.2.1. Les causes

Pour l'oreille externe, il s'agit le plus souvent de l'obstruction du conduit, généralement par un bouchon de cérumen, qu'il est alors facile de dissoudre ou d'extraire.

Les surdités de l'oreille moyenne sont principalement le catarrhe, dû à l'obstruction de la trompe d'Eustache, les différentes formes d'otites, les traumatismes, déflagrations ou chocs crâniens susceptibles de déchirer le tympan, et surtout l'otospongiose, la plus typique des surdités de transmission.

2.2.2. L'otospongiose

Également nommée *otosclérose,* c'est l'ossification de l'étrier dans la fenêtre ovale. Celui-ci se développe anormalement jusqu'à se souder et s'immobiliser dans le cadre de la fenêtre. La chaîne des osselets ne peut plus vibrer et transmettre les sons à l'oreille interne.

Cette maladie atteint plutôt les femmes que les hommes (à près de 70 %) et est souvent héréditaire, sautant volontiers une génération. Elle est probablement liée à des facteurs hormonaux, et se manifeste à la puberté, est aggravée par la grossesse ou l'allaitement, et peut se stabiliser au moment de la ménopause.

2.2.3. Conséquences sur l'audition

L'otospongiose atteint essentiellement les basses fréquences, c'est-à-dire que l'oreille se comporte alors comme un filtre passe-haut, laissant relativement intactes, au début tout au moins, les hautes fréquences. Cela implique des conséquences particulières sur l'audition.

L'intelligibilité de la parole, localisée surtout dans les hautes fréquences du spectre sonore, se trouve donc relativement peu touchée

dans un premier temps : l'audition téléphonique, pauvre en aigu, reste possible.

Les sourds par otospongiose entendent mieux dans un bruit de fond élevé. Ce phénomène, appelé **paracousie**, n'est paradoxal qu'en apparence : il s'explique par le fait que dans le bruit, les non sourds élèvent la voix, et qu'en outre le bruit émerge surtout dans les basses fréquences, moins bien perçues par le sourd de transmission.

L'otospongiose provoque également un phénomène d'**autophonie**, c'est-à-dire une perception exagérément renforcée des sons de son propre corps, comme les bruits de mastication (le sujet doit cesser de mâcher pour entendre).

Le son de sa propre voix (*side tone*) est perçu trop fort, ce qui entraîne une baisse réflexe du niveau vocal parlé. Cependant, le timbre reste inchangé, et la voix est modulée normalement.

Enfin, cette surdité s'accompagne d'**acouphènes**, c'est-à-dire de bruits internes, entendus dans la tête, généralement de basses fréquences, bourdonnements ou bruits blancs, comme des impressions de chutes d'eau, souffles, jets de vapeur, etc. D'ailleurs, contrairement à ce que certains pourraient croire, la surdité n'est pas « le monde du silence », mais bien au contraire un excès de bruits intérieurs, alors même que les sons extérieurs ne sont plus entendus.

2.2.4. Traitement de l'otospongiose

Il n'existe pas à l'heure actuelle de traitement préventif ou curatif de l'otospongiose En revanche, la cophochirurgie (chirurgie de la surdité) permet des succès dans près de 95% des cas.

Dès 1935, le Français Sourdille pratiqua la **fenestration**, c'est-à-dire le percement d'une nouvelle fenêtre au niveau du vestibule ; la chaîne ossiculaire restait immobile, mais les sons pouvaient se transmettre à la

cochlée puisque la périlymphe vibrait à nouveau. Cependant, une perte de 25 à 30 dB demeurait inévitable.

L'idée de rendre mobile l'étrier est ancienne (Miot, 1889), mais a été reprise et améliorée par l'Américain Rosen en 1953 : c'est la **mobilisation.** Cette opération s'attaquait directement à la cause mécanique de la surdité, et tentait de libérer la fenêtre ovale soit directement par de légères pressions sur la tête de l'étrier, soit en perçant préalablement tout autour un léger pointillé (procédé du « timbre-poste » de Clerc). Dans ce cas, la récupération auditive pouvait être totale dans l'immédiat, mais dans plus de la moitié des cas, l'otospongiose se réactivait au bout de quelques années.

La fenestration et la mobilisation seules sont maintenant abandonnées. On pratique actuellement une **stapédectomie** partielle, c'est-à-dire une ablation des branches de l'étrier ; la platine laissée en place est préalablement percée d'un petit trou, et une tige de Téflon, fixée à la branche descendante de l'enclume, coulisse travers cet orifice (Téflon-piston transplatinaire, Shea, 1962). Il existe bien sûr des variantes, et des perfectionnements sont continuellement apportés à la chirurgie de l'otospongiose.

2.3. La surdité de perception

2.3.1. Les causes

Ce type de surdité concerne l'oreille interne. Les causes principales en sont les traumatismes sonores, les produits toxiques, et le vieillissement normal de l'individu.

Les traumatismes sonores peuvent être brusques et accidentels, mais les cas les plus significatifs sont dus à des expositions prolongées au bruit : c'est le domaine des surdités professionnelles. Les traumatismes

sont d'autant plus importants que le bruit est aigu, intermittent, et bien sûr intense. A partir de 90 dB, tout bruit est traumatisant, et certaines machines dépassent largement les 100 dB.

Les lésions intéressent la cochlée et sont la conséquence directe de la localisation précise des fréquences le long de la membrane basilaire (tonotopie).

Cette infirmité est désormais reconnue maladie du travail, sous certaines conditions, par un décret de 1963. La liste des métiers et travaux susceptibles de provoquer une surdité à caractère professionnel s'est encore allongée par un nouveau décret promulgué en 1981. L'exposition doit être d'un an au minimum (durée réduite à un mois pour le travail sur les réacteurs) et le déficit constaté de 35 dB sur les deux oreilles.

Les substances toxiques susceptibles d'agresser le système auditif sont nombreuses : nicotine, oxyde de carbone et plomb (pots d'échappement) ; également certains médicaments, antibiotiques comme la streptomycine ou la néomycine, de même que la quinine et les anesthésiques généraux.

2.3.2. Aspects audiométriques

Comme nous l'avons vu, la surdité de perception concerne surtout les hautes fréquences.

La perte d'audition illustrée par la figure 61 est particulièrement sévère ; les basses fréquences ne sont que peu touchées, mais la chute est brutale à partir de 1000 Hz.

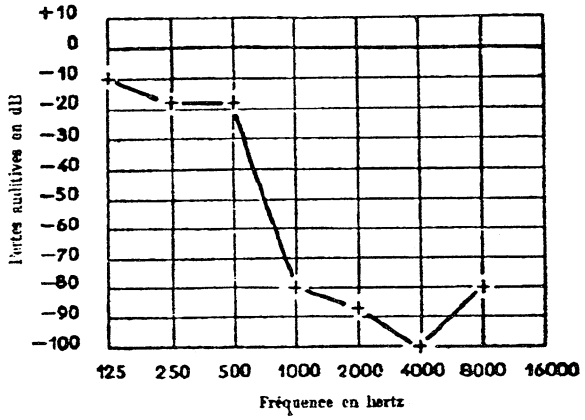


Fig. 61 : surdité de perception

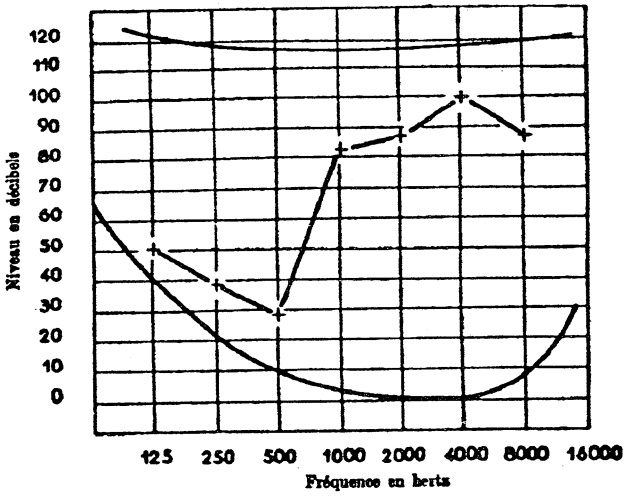


Fig. 62 : audiogramme en valeurs de seuils

L'exemple est encore plus frappant si l'on reporte ce seuil d'audibilité sur un diagramme de Wegel (fig. 62) : c'est l'audiogramme en valeurs de seuil, la courbe 0 Ph n'est pas redressée.

2.3.3. Conséquences sur l'audition

Atteignant les hautes fréquences, la surdité de perception agit comme un filtre passe-bas, c'est-à-dire à l'inverse de la surdité de

transmission. L'intelligibilité de la parole est par conséquent mauvaise, la réception téléphonique gravement perturbée, voire impossible. L'audition du bruit de fond, quant à elle, est privilégiée : le sujet entend qu'on lui parle, mais ne comprend pas ce qu'on lui dit.

La surdité de perception fait encore sentir ses effets sur le débit parlé du sujet : la voix devient plus forte et surtout plus sourde, conséquence directe de la perte auditive des harmoniques aigus. De même, la modulation de la voix est plus monocorde et les intervalles ont tendance à rétrécir.

Les acouphènes se situent dans la zone des fréquences perdues : sifflements aigus, impressions de gazouillis d'oiseaux...

2.4. La presbyacousie

C'est l'augmentation progressive du seuil d'audibilité des fréquences élevées avec l'âge. Cette surdité, conséquence du vieillissement des individus, est donc évolutive.

La cause en est certainement une dégénérescence des cellules de Corti, du ganglion spiral et du nerf auditif, une atrophie des stries vasculaires, et une rigidité croissante de la membrane basilaire à partir de la base (d'où un déficit commençant dans l'aigu).

La presbyacousie débute en réalité très tôt, parfois vers 25 ans, mais fait rarement sentir ses effets avant 35 ans. Elle peut devenir réellement gênante à partir de 50 ans.

La figure 63 montre l'effet de la sénescence sur l'audition : les aigus sont plus touchés que les graves, et la perte de sensibilité est progressive. L'intelligibilité de la parole est donc plus touchée que le niveau sonore, ce qui permet d'expliquer cette réaction typique des personnes âgées qui comprennent mal ce qu'on leur dit mais ne supportent pas que l'on parle trop fort.

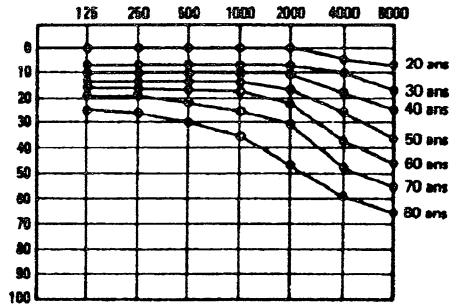


Fig. 63 : la presbyacousie

La presbyacousie est souvent à l'origine des divergences de jugement ou d'appréciation constatées entre musiciens d'âge très différent. La perception du timbre, notamment, cristallise les conflits de génération dans des domaines comme la lutherie (jugement sur la sonorité d'un instrument) ou la direction d'orchestre (balance de la couleur d'ensemble). La courbe de réponse du système auditif conditionne évidemment pour chacun une façon personnelle et unique d'entendre, et si tout le monde s'accorde théoriquement sur ce point, la pratique trahit encore bien des discussions oiseuses, et en tout cas inutiles, ayant simplement pour origine des oreilles qui n'entendent pas la même chose.

2.5. Les surdités centrales

Cette dénomination regroupe les lésions du système nerveux central, jusqu'au cortex. Dans les atteintes sous-corticales, l'altération auditive prend la forme d'une surdité de perception.

Si le cortex est concerné, c'est l'intégration du message qui est perturbée, pouvant se traduire par l'incompréhension du langage parlé (agnosie auditive), alors que l'oreille est intacte.

Entrent également dans cette catégorie les surdités psycho-somatiques, d'origines névrotiques ou hystériques, dont les causes sont très diverses : choc affectif violent, traumatisme psychique lié à une

explosion (guerre, attentat). Il est clair que ces cas ne relèvent pas de l'oto-rhino-laryngologie traditionnelle.

D'autres troubles auditifs, plus rares, peuvent encore se manifester. Un sujet muni d'un casque reçoit un même son alternativement à gauche et à droite : la **diplacousie** est le fait de ne pas entendre la même hauteur à chaque fois, et donc de percevoir un intervalle en passant d'une oreille à l'autre. En réalité, celles-ci ne perçoivent jamais exactement la même hauteur, mais l'écart reste normalement faible ; la diplacousie concerne une sensation d'intervalle supérieure au demi-ton.

Une autre affection, plus rare mais également plus difficile à déceler, est une distorsion de la sensation de hauteur appelée parfois *maladie de Fauré* (en référence aux troubles dont fut atteint ce compositeur à la fin de sa vie). Fauré entendait les graves environ une 3ce mineure trop bas, et les aigus une 3ce mineure trop haut. On peut imaginer la cacophonie qui résulte d'une musique ainsi anamorphosée. Progressivement, son audition intérieure fut atteinte à son tour, et la lecture même de la musique devint pour lui un supplice qui le contraignit à un silence définitif.

L'**amusie**, également très rare, est à ranger parmi les agnosies : c'est l'impossibilité de reconnaître une mélodie dans une succession de notes. Les organes sensoriels sont ici encore normaux, et c'est au niveau du cortex que se situe cette infirmité, comparable à certaines aphasies dans lesquelles le sujet entend une suite de mots sans pouvoir l'organiser en phrases ; de même pour les sons musicaux qui ne se structurent pas en une unité de niveau supérieur.

3. L'audiométrie

L'audiométrie est l'ensemble des techniques permettant de mesurer l'acuité auditive, de quantifier la baisse de la sensibilité, et par là-même

de dépister et d'identifier la surdité. L'audiométrie tonale utilise des sons sinusoïdaux, l'audiométrie vocale, les sons de la voix parlée.

3.1. Dépistage chez les enfants

Il ressort de ce que nous venons de voir que les différentes surdités ne produisent pas les mêmes effets, et qu'il n'est pas toujours aisé de les déceler, au moins de façon précoce. Ceci est particulièrement vrai chez les enfants.

Il est important, pour tous ceux qui se destinent une carrière d'enseignement, d'être sensible à ce problème, et en cas de doute, d'orienter les familles vers un médecin spécialiste.

3.1.1. Travaux de Gellé

A la fin du XIX^{ème} siècle, Marie Ernest Gellé, médecin inspecteur de l'Instruction publique, fit paraître un travail capital sur l'otologie[1], dans lequel se trouve un chapitre, malheureusement peu remarqué à l'époque, consacré à l'audition à l'école : ayant testé l'audition d'un grand nombre d'élèves de l'enseignement primaire de façon très simple, au moyen du tic-tac de sa montre de gousset, il établit une corrélation nette entre mauvais résultats scolaires et hypoacousie, celle-ci, dans presque tous les cas, non connue des intéressés, ni d'ailleurs des instituteurs. En bref, d'après Gellé, beaucoup de « cancres » entendent mal et n'en ont pas conscience. (Les reléguer au fond de la classe, pratique courante à l'époque, n'arrangeait évidemment pas les choses). Ayant besoin de plus de concentration pour comprendre, ils se fatiguent plus vite, et leur d'attention tombe plus tôt.

---

[1] M.E. Gellé, *L'audition et ses organes*, Paris, 1899.

3.1.2. Indices à surveiller

Une observation attentive de la part des maîtres ou des instituteurs peut permettre par le médecin un dépistage précoce. Quelques indices trahissent souvent une déficience auditive chez un enfant :

•son attitude : s'il est trop sérieux, pas assez bruyant lors des récréations s'il penche anormalement la tête pour écouter ;

•le timbre de sa voix : s'il manque de clarté, s'il est sourd, ou trop grave si la voix est monotone ;

•les fautes d'orthographe ou de prononciation : elles peuvent traduire une mauvaise compréhension due à une déficience auditive. C'est surtout la déformation systématique de certains sons qu'il faut surveiller, comme la transformation de consonnes sonores en sourdes (b→p, d→t, etc.). Ceci s'explique par le fait que la surdité de perception empêche d'entendre les harmoniques aigus des consonnes sonores, et la voix les reproduit alors difficilement.

3.1.3. Audiométrie statistique

Les travaux actuels confirment les observations de Gellé, et l'hypoacousie est reconnue comme une cause importante d'insuccès scolaire. D'autre part, les déficiences auditives, pas forcément très graves, sont plus répandues qu'on ne le croit généralement, comme l'ont montré des tests simples sur l'audition des hautes fréquences par des enfants de la région parisienne : la majorité d'entre eux n'entendaient pas jusqu'à 18 000 Hz, quelques-uns même présentaient une surdité sévère aux aigus, et ne le savaient pas.

3.2. Tests complémentaires

L'audiogramme tonal, pour utile qu'il soit, n'est pas suffisant. Il utilise la **conduction aérienne**, symbolisée CA, c'est-à-dire le son qui passe par l'oreille externe et moyenne avant de parvenir au labyrinthe.

Il est possible de recueillir des renseignements sur la seule oreille interne en utilisant la **conduction osseuse**, ou CO : pour cela, un vibrateur, délivrant des fréquences identiques à celles de l'audiogramme, est appliqué sur la mastoïde.

La CA indique ce qu'entend réellement le sujet, et la CO, ce qu'il « devrait » entendre, puisque dans ce cas, seul son appareil de perception est en cause. Le principe de la plupart des tests complémentaires repose sur la comparaison de la CA et de la CO.

3.2.1. Le Rinné

Chez un sujet normal ou atteint de surdité de perception, les courbes de la CA et de la CO sont superposées : le Rinné est dit *nul* (CA = CO). Pour une surdité de perception, les courbes marqueront bien entendu un déficit, mais resteront superposées. Dans la surdité de transmission, la CA est moins bonne que la CO : le Rinné est alors *négatif*.

Il est également possible, avec des diapasons, de mesurer la **durée de perception**. Chez un sujet sain ou atteint de surdité de perception, le son est entendu pendant environ 30 secondes par conduction aérienne après sa disparition par conduction osseuse : le Rinné est *positif*. Dans le cas d'une surdité de transmission, c'est le contraire qui se produit : l'audition par conduction aérienne disparaît la première, la CO dure plus longtemps, et le Rinné est négatif.

3.2.2. Le Weber

Le Weber est un test permettant de comparer les oreilles entre elles. Un diapason ou un vibrateur est appliqué au sommet du crâne, sur la ligne médiane (vertex) : si le sujet entend le son aussi fort dans les deux oreilles à la fois, s'il n'y a pas de latéralisation, les oreilles sont normales ou atteintes identiquement, le Weber est *indifférent*.

A l'inverse, si le déficit est unilatéral ou si une oreille est plus touchée que l'autre, le sujet entend dans l'oreille la meilleure s'il s'agit d'une surdité de perception, et dans l'oreille la moins bonne dans le cas d'une surdité de transmission.

3.2.3. L'audiométrie vocale

L'audiogramme tonal, comme les tests de Rinné et de Weber, sont pratiqués avec des sons sinusoïdaux, ce qui a l'avantage d'être précis quant à la fréquence, mais assez éloigné des conditions réelles d'audition. C'est pourquoi il peut être utile de tester, et même de mesurer, chez un malentendant, la compréhension de la parole.

Le principe en est simple : des listes de mots soigneusement sélectionnés, (généralement dissyllabiques, de genre masculin et ne se terminant pas par un e muet) sont communiquées oralement au sujet isolé dans une cabine, à différents niveaux sonores ; on note le pourcentage de mots répétés correctement à chaque intensité, et des **courbes d'intelligibilité** peuvent être tracées. Des études statistiques ont montré que 50 % de mots compris sont nécessaires et suffisants pour assurer l'intelligibilité d'une conversation.

3.2.4. Test de Lee

Certains tests ont pour but de dépister les simulateurs de surdité (en cas d'expertise médicale, par exemple). Dans le *test de Lee*, également appelé *test d'Azzi*, un sujet muni d'un casque parle et entend sa voix avec un retard de quelques dixièmes de secondes : généralement, il bafouille et les efforts qu'il fournit pour s'exprimer normalement trahissent une audition correcte dans le casque. Cette expérience est facilement réalisable avec un magnétophone muni de deux têtes distinctes pour l'enregistrement et la lecture.

Ce test n'est bien sûr pas le seul utilisé pour déceler les simulations ou exagérations de surdité, mais il met en évidence l'importance d'un contrôle auditif correct pour une parole normale.

4. Conclusion

La surdité, contrairement à la cécité, est une infirmité mal admise par la société. Autrefois considérés comme malades mentaux et privés de leurs droits et privilèges de citoyens par le Code justinien (VI^{ème} s. ap. J.--C.) les sourds sont encore aujourd'hui l'objet de moqueries (personnages comiques malgré eux dans des films ou des bandes dessinées), et provoquent facilement l'impatience, voire l'irritation de leurs interlocuteurs : l'expression « sourd comme un pot » dit assez l'estime dans laquelle est tenu l'hypoacousique.

Le dépistage en milieu scolaire est tout à fait insuffisant. Des examens de la vue sont pratiqués périodiquement — et c'est une bonne chose —, mais l'équivalent n'existe pas pour l'audition. Or, même si certaines sont légères, les déficiences auditives sont nombreuses, avec leurs conséquences sur la scolarité.

L'ouïe est un sens bien malmené par notre époque, où la pollution sonore a pris une ampleur considérable. Les pratiques de certains jeunes aggravent encore sur eux-mêmes les effets du bruit. Ainsi les concerts ou l'écoute au casque à des niveaux sonores proches du seuil de douleur vieillissent prématurément l'oreille : une étude récente, effectuée aux États-Unis, a montré que les américains de 20 ans présentent à l'heure actuelle le profil auditif de la génération des 40/50 ans. Ce que seront leurs oreilles dans vingt ans, nul ne peut le dire aujourd'hui...

Une baisse de la sensibilité auditive générale est de toute façon observée en milieu urbain ; certains chercheurs l'ont même baptisée **socioacousie**[1] tant son caractère collectif est prononcé.

L'homme devient-il sourd ? Le visuel prend-il irrémédiablement le pas sur l'auditif ? Si de telles questions relèvent heureusement encore du domaine de la spéculation, il n'en reste pas moins que l'audition est menacée, et que seule une prise de conscience rapide et active est en mesure de lui conserver son intégrité.

---

[1] J. Méry, "Presbyacousie et socioacousie", *Revue d'Acoustique,* n° 37, 1976.

CHAPITRE XIII

LA SENSATION DE HAUTEUR

1. Introduction

La hauteur est de toute évidence la plus importante des qualités subjectives du son. Comme nous l'avons vu précédemment (chap. X), ce paramètre fut le premier, parfois le seul, à avoir été fixé par l'écriture, et les plus anciens ouvrages sur la musique traitent dès leur apparition de calculs de hauteur et d'intervalles.

L'audition est plus précise pour les hauteurs que pour les autres paramètres sonores. L'oreille absolue n'existe pas pour l'intensité (impossibilité due à la musculature ossiculaire) et si l'échelle des nuances comporte *grosso modo* 7 échelons, la musique utilise (en Occident du moins) 12 demi-tons par octave.

C'est également avec la hauteur que les exigences de précision sont les plus grandes. On ne dénature pas fondamentalement une oeuvre musicale en en modifiant quelque peu les nuances, les timbres ou le tempo ; en revanche, quelques hertz de plus ou de moins, dans certaines conditions, peuvent faire grincer des dents...

2. La mesure de la hauteur

Nous savons que, d'une manière générale, la sensation de hauteur est proportionnelle à la fréquence d'une onde sonore, et par conséquent inversement proportionnelle à la longueur d'un tuyau sonore ou d'une corde vibrante. Mais cette sensation suit ses lois propres et ne se conforme pas strictement aux phénomènes physiques.

2.1. Hauteur et logarithmes

Par rapport à la fréquence, la perception suit une progression logarithmique. Il est aisé de mettre ce principe en évidence par un exemple. L'octave physique, c'est-à-dire le rapport 2, est égale au produit d'une quinte par une quarte, ce qui s'écrit :

$$\frac{3}{2}\times\frac{4}{3}=\frac{12}{6}=2$$

Sur le plan perceptif, nous n'entendons pas un produit, mais une somme, c'est-à-dire :

$$5^{te}+4^{te}=8^{ve}$$

A une excitation croissant en progression géométrique, correspond donc, comme pour l'intensité, une sensation progressant arithmétiquement.

2.2. Les unités de mesure

L'unité de mesure des intervalles intuitivement utilisée par les musiciens est donc de nature logarithmique. Le ton, soit seul ou en combinaison (tierce, sixte...), soit fractionné (1/2 ton, 1/4 de ton) s'ajoute et se retranche.

Les unités de mesure des acousticiens obéissent au même principe, mais sont plus petites, très inférieures au ton, afin de pouvoir mesurer des micro-intervalles.

L'unité la plus utilisée en France jusqu'à ces dernières années était le **savart**, symbolisé σ (lettre grecque sigma minuscule). On pose par convention :

$$10^3 \log 2 = 301\ \sigma$$

En d'autres termes, on part du logarithme du rapport d'octave, soit 2, que l'on multiplie par 1000 (10^3) pour obtenir une unité maniable (sinon 1 σ vaudrait presque un tiers d'octave, ce qui serait beaucoup trop grand).

L'octave comprenant 12 demi-tons, nous en déduisons la valeur d'un demi-ton :

$$301 \div 12 \approx 25\ \sigma$$

et celle d'un ton :

$$301 \div 6 \approx 50\ \sigma$$

Le signe ≈ peut surprendre par son manque de rigueur. N'oublions pas cependant que nous mesurons des intervalles perçus, et que toute précision supérieure à ce que l'oreille peut entendre ne présente pas grand intérêt pour la psychoacoustique. C'est pourquoi, dans la plupart des calculs, il est fréquent d'utiliser la valeur de 300 σ arrondie pour l'octave (au lieu de 301), l'erreur entraînée par une telle approximation étant généralement insignifiante. Mais toutes les fois que la précision s'avère nécessaire, rien n'empêche de rétablir les décimales aux résultats.

Le savart présente deux avantages. D'abord de correspondre approximativement au plus petit intervalle que l'oreille peut percevoir dans les meilleures conditions ; ensuite d'exprimer directement le résultat I_σ à partir d'un rapport de fréquences quelconque, par la formule générale :

$$I_\sigma = 10^3 \log \frac{N_2}{N_1} \qquad (47)$$

Malgré ses qualités, le savart n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui, détrôné par une unité anglo-saxonne, le ***cent*** : on pose par convention que le demi-ton tempéré vaut 100 *cents*, ce qui en représente 1200 pour l'octave. Cela s'écrit :

$$\sqrt[1200]{2} = 2^{\frac{1}{1200}} = 1{,}0005777895$$

Ce nombre est celui par lequel il faut multiplier une fréquence pour l'élever d'un cent...

Dans ce système, un ton tempéré vaut 200 cents, de sorte que cette unité est évidemment très petite, et peut-être trop, puisque cela ne correspond plus à aucune possibilité perceptive. A titre comparatif, un savart est égal à 3,986 cents.

Voici une formule permettant de calculer un intervalle I_c en cents :

$$I_c = \left(\frac{\log \frac{N_2}{N_1}}{\log 2}\right) \times 1200$$

2.3. Application numérique

1) Quelle est la valeur, exprimée en savarts et en cents, de la tierce majeure naturelle ?

Le rapport de tierce majeure naturelle étant 5/4, nous posons :

$$\frac{5}{4} = 1{,}25$$

$$I_\rho = 10^3 \log 1{,}25 = 0{,}097 \times 10^3 = \boxed{97\ \sigma}$$

$$\frac{\log 1{,}25}{\log 2} \times 1200 = \boxed{386 \text{ cents}}$$

Nous constatons au passage que la tierce majeure naturelle est plus petite de 14 cents (environ 3 σ) que la tierce majeure du tempérament égal qui en vaut 400.

2) A quelle note de musique correspond la fréquence 262 Hz ?

Nous savons que le la_3 est fixé à 440 Hz. Nous écrivons par conséquent :

$$\frac{\log \frac{440}{262}}{\log 2} \times 1200 = 898 \text{ cents}$$

La valeur obtenue est l'intervalle situé entre le la_3 et la note cherchée ; 898 cents représentent 9 demi-tons sous le la_3, c'est-à-dire la note $\boxed{do_3}$.

3. Hauteur et tonie

La sensation de hauteur ne suit pas une loi simple que la fréquence décrirait complètement. Comme pour l'intensité, il existe des différences entre ce qui est mesuré et ce qui est perçu. Nous distinguerons donc entre la hauteur physique, la fréquence exprimée en hertz, et la **tonie** ou hauteur subjective, qui peut être exprimée en cents (ou en savarts), c'est-à-dire par la mesure de l'écart existant entre réalité et sensation.

3.1. Élaboration de la sensation de hauteur

Indépendamment de l'aspect physiologique qui ne nous concerne pas ici, la question est de comprendre comment s'élabore pour l'homme l'impression de hauteur, ou plus exactement, ce qui, dans un son, détermine sa hauteur.

3.1.1. Hauteur tonale

Il est évident que dans le cas d'un son sinusoïdal, qui ne comprend par définition qu'un seul composant (fig. 64 a), c'est directement sa fréquence qui détermine la sensation.

Mais pour de tels sons, presque toujours artificiels, la précision de l'oreille est nettement moins bonne qu'avec des sons riches en

harmoniques. En effet, un musicien effectuant une dictée musicale composée seulement de sons purs voit ses performances sensiblement s'altérer, et commet des erreurs inhabituelles pour lui ; cela est net avec les grands intervalles qui sont plus difficiles à reconnaître.

3.1.2. Hauteur spectrale

Sauf pour quelques rares instruments, ou certains jeux d'orgue, les sons musicaux sont des spectres possédant plusieurs composants.

Dans un spectre harmonique, ce n'est pas le fondamental que l'on entend, mais la fréquence existant entre deux harmoniques de rangs consécutifs, et qui se trouve être précisément celle du fondamental (cf. la loi de Fourier).

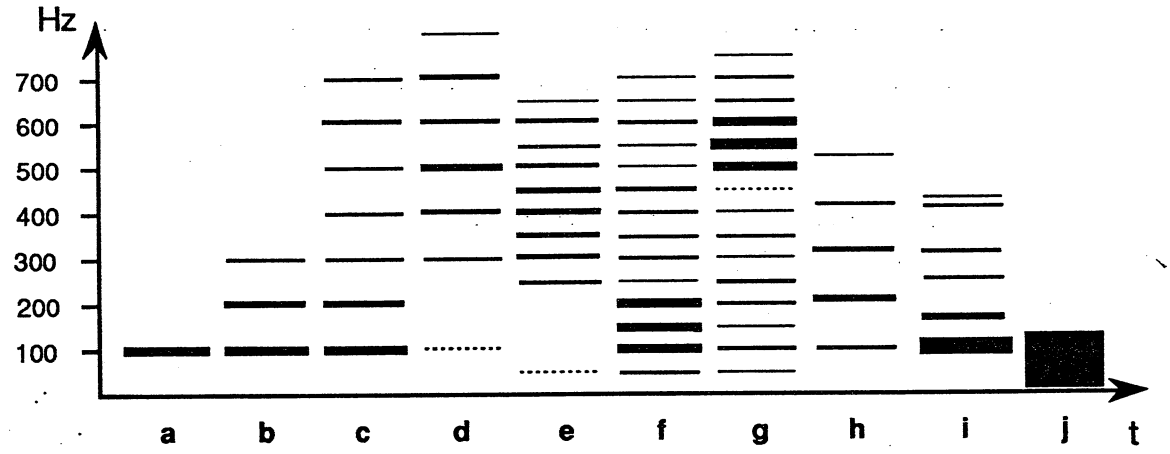


Fig. 64 : la sensation de hauteur

Ce fondamental peut être absent, il peut manquer plusieurs composants (fig. 64 d), la hauteur perçue, résiduelle en quelque sorte, reste la même.

Ceci explique que l'on puisse entendre des sons graves diffusés par de petits haut-parleurs ou des écouteurs qui amputent les spectres et sont

incapables de rayonner à distance de véritables basses fréquences : l'oreille reconstitue ce qui n'existe pas.

Pour les sons non périodiques, si l'inharmonicité spectrale est faible (fig. 64 h), comme pour le piano, par exemple, l'oreille réagit comme si le spectre était harmonique : la différence existant entre un partiel et la fréquence théorique de l'harmonique correspondant est négligée.

Si au contraire l'inharmonicité est forte (fig. 64 i), nous percevons la ou les fréquences des partiels les plus intenses. Tout dépend du degré d'inharmonicité, et pour de tels sons, il est difficile d'établir des règles générales. Il existe une infinité de possibilités entre ces deux extrêmes. Le cas limite est représenté par le spectre de bruit (fig. 64 j) qui ne donne pas une sensation de hauteur à proprement parler, mais plutôt de registre. Chocs de « hauteurs » différentes, bruits de souffle tels *chhh* plus grave que *sss*.

3.1.3. Hauteur formantique

Jusqu'à une époque récente, la théorie de la hauteur spectrale fut la seule à rendre compte de la perception de ce paramètre. Mais l'apparition des ordinateurs et de la synthèse sonore a permis une avancée importante en ce domaine.

Une expérience simple permet de comprendre ce qu'est la hauteur formantique. Les sons f et g de la figure 64, rigoureusement de même fréquence puisque l'écart entre leurs harmoniques respectifs est identique, sont émis alternativement plusieurs fois. Nous devrions donc entendre des sons de même hauteur, mais de timbre différent, leurs formants ne se situant pas au même endroit. Or, à l'audition, il se produit une légère sensation d'intervalle entre les deux sons, g paraissant plus aigu que f.

Notre oreille est très sensible à la répartition de l'énergie dans un spectre, ce qui provoque une distorsion de la sensation de hauteur laquelle, sans remettre en cause la loi de la hauteur spectrale, est loin d'être négligeable. Nous dirons que les sons f et g sont de même fréquence, mais de **tonie** différente.

Les sons b, c et d sont de même fréquence mais la distribution de leur énergie spectrale est différente : leur tonie est croissante de l'un à l'autre. Le cas de e est encore plus intéressant : il est à l'octave inférieure de b, mais son énergie se situe tout entière dans l'aigu : il se produit alors une ambiguïté de hauteur entre les deux sons, l'oreille hésitant à désigner le plus grave ou le plus aigu des deux.

La hauteur formantique est systématiquement étudiée à l'heure actuelle avec les moyens modernes cités plus haut[1]. Les chercheurs ont fabriqué des sons « inouïs » au sens étymologique du terme, mettant en évidence des propriétés encore inconnues de notre perception. C'est ainsi qu'il existe maintenant des *sons paradoxaux*, véritables illusions sonores, qui montent dans l'aigu tout en devenant plus grave, descendent dans le grave tout en restant à la même hauteur, et bien d'autres encore... J.–C. Risset a créé de tels sons et les a intégrés dans plusieurs de ses compositions[2].

Cette particularité de notre système auditif est très importante, et entraîne des conséquences sur la pratique musicale encore mal comprises jusqu'ici (cf. infra).

Nous distinguerons désormais entre hauteur physique, ou *stricte*, et hauteur subjective, ou *tonie* ; un intervalle strict correspond à un rapport de la série harmonique, il est *juste* s'il est subjectivement perçu comme tel. Le rapport de quinte stricte 3/2 est généralement accepté comme juste,

---

1 Cf. en particulier J.-C. Risset, "Paradoxes de hauteur", *Rapports IRCAM,* Paris, 1978.
2 Par exemple *Inharmonique*, pour voix et bande magnétique (1977).

la septième mineure 7/4 est stricte, mais rejetée comme fausse par les musiciens formés au tempérament égal.

4. Interférence des paramètres

Les quatre paramètres définissant un son, hauteur, durée, intensité et timbre, peuvent interférer entre eux, agir les uns sur les autres par interaction, provoquant des distorsions de la perception. Les sons paradoxaux que nous venons d'évoquer en sont un exemple, où une modification de la composition spectrale, donc du timbre, entraîne une variation de la sensation de hauteur. Il existe d'autres phénomènes d'interférences, que nous allons étudier à présent.

4.1. Hauteur et registre

L'oreille n'a pas le même comportement — ni d'ailleurs les mêmes performances — dans le grave ou l'aigu de l'aire audible, et le diagramme de Fletcher avait déjà montré la non linéarité du système auditif dans l'interférence hauteur/intensité. Il s'agit maintenant de l'appréciation des intervalles en fonction de la hauteur.

4.1.1. Distorsion de la sensation d'intervalle

Un intervalle n'est pas toujours perçu identiquement : cela dépend du registre où il se trouve. D'une façon générale, un intervalle juste dans le médium paraît trop court dans l'aigu, et trop long dans le grave.

Cette distorsion est particulièrement bien mise en évidence avec les octaves : les rapports stricts 2000/4000 Hz, 3000/6000 Hz, et a fortiori des fréquences plus élevées, « tirent » vers la septième. A l'inverse, des graves comme 80/160 Hz ou 100/200 Hz passent presque pour des octaves

augmentées, en tout cas trop longues ; mais dans le registre médium 400/800 ou 800/1600 Hz sonnent juste à l'oreille.

Ce phénomène pèse fortement sur toute la problématique de la justesse, et concrètement sur l'accordage des instruments à grande étendue, comme l'orgue ou le piano (cf. infra).

4.1.2. L'échelle des mels

Le mel (abréviation de *melody*), inventé par l'acousticien américain Stevens, est l'unité de tonie destinée à mesurer l'écart entre la justesse physique, c'est-à-dire celle des rapports stricts, et la réalité perceptive.

On pose par convention que 1000 mels correspond à 1000 Hz, et que l'octave de 1000 mels est 2000 mels. L'octave juste de 1000 Hz valant environ 2100 Hz, on peut montrer qu'à 2000 Hz correspondent 1800 mels, et ainsi de suite.

Mais la tonie variant beaucoup avec les individus, l'échelle des mels n'a guère d'utilité pratique. Elle a en outre été établie au moyen de sons sinusoïdaux, ce qui l'éloigne de la réalité musicale.

4.2. Hauteur et intensité : le diagramme de Stevens

La tonie varie avec l'intensité. Ce phénomène est particulièrement net avec les sons sinusoïdaux, mais pas seulement, comme nous le verrons plus loin.

Stevens a étudié quantitativement cette variation dont les résultats sont portés sur un diagramme (fig. 65). Lorsque l'intensité, figurant en abscisse, augmente, les graves semblent baisser, les médiums, entre 800 et 3000 Hz, restent à peu près stables, et les aigus semblent monter ; en ordonnée figure le pourcentage de déviation subjective. Il est facilement obtenu par comparaison, en demandant au sujet d'égaliser en hauteur

deux sons, l'un fort, l'autre faible. Le pourcentage de différence de fréquence constatée peut aussi être exprimé en cents.

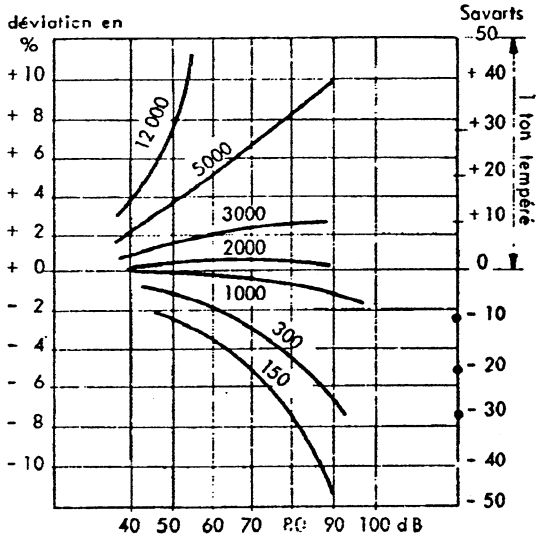


Fig. 65 : le diagramme de Stevens

Une déviation de hauteur de 6 % est obtenue facilement, et cela représente déjà un demi-ton. En effet, la fréquence 4000 Hz à faible intensité, par exemple, sonne subjectivement à la hauteur 4240 Hz à 90 dB. D'où :

$$\left(\frac{\log \frac{4240}{4000}}{\log 2}\right) \times 1200 = 101 \text{ cents}$$

Il est possible de vérifier cette sensation en approchant progressivement un diapason vibrant près de son oreille : le son semble baisser, mais très légèrement, d'une part parce que la variation d'intensité est faible, d'autre part parce que 440 Hz est un fréquence moyenne et que sa tonie est peu sensible aux changements de niveau.

L'effet est globalement moins net avec les sons complexes, mais leurs composants sont néanmoins sinusoïdaux et sensibles individuellement aux variations d'intensité ; comme le spectre comporte généralement à la fois des basses et des hautes fréquences, la déviation

opère simultanément dans les deux sens, créant une dissonance dans le timbre du son joué très fort. Un son harmonique peut ainsi donner l'impression de se désaccorder à forte intensité.

4.3. Hauteur et durée

L'influence du temps sur la tonie est encore mal connue. Des hypothèses ont été émises sur un éventuel rapport entre un temps psychologique, susceptible de varier dans son appréciation, et la hauteur, fonction du temps physique, astronomique, pourrait-on dire.

La « seconde psychologique » qui s'allonge sous l'effet de l'ennui ou rétrécit avec l'excitation aurait-elle une incidence sur la fréquence d'un son, dans le sens qu'elle contiendrait un plus ou moins grand nombre de périodes ? Cela paraît fantaisiste.

Un tout autre domaine de recherche est celui des différents temps d'intégration des sons au sein du système auditif, qu'on appelle les *constantes de temps*.

L'oreille comporte une partie mécanique, l'appareil de transmission, qui n'échappe pas aux lois de l'inertie et demande donc un certain délai pour répondre aux stimulations. Ce temps, de l'ordre de quelques millisecondes, varie avec de nombreux facteurs, comme l'intensité, le timbre ou la fréquence.

D'autres constantes de temps, nettement plus longues, plusieurs dizaines de millisecondes, concernent la durée nécessaire à la reconnaissance d'une hauteur ou d'un timbre. Les travaux sont en cours en ce domaine, et les résultats encore peu nombreux et souvent contradictoires.

4.4. Le vibrato

Un son est rarement d'une stabilité rigoureuse, et particulièrement en musique avec la pratique du vibrato, qui se définit comme une fluctuation systématique de la hauteur et/ou de l'intensité.

4.4.1. Données psycho-physiologiques

Un vibrato est caractérisé par deux paramètres : sa **vitesse**, c'est-à-dire le nombre de fluctuations par seconde, et sa **profondeur de modulation**, à savoir l'intervalle balayé par la fluctuation.

Si la fluctuation est lente, jusqu'à 5 par seconde, l'oreille entend une *ondulation* dont elle peut facilement suivre le contour ; si la vitesse du vibrato est rapide, plus de 10 Hz, on perçoit une succession de notes voisines, un *trémolo* ou un *chevrotement* ; mais entre ces deux valeurs, pour un vibrato compris entre 6 et 10 fluctuations par seconde, l'oreille ne perçoit plus de variations de hauteur, mais seulement d'intensité, au rythme du vibrato.

Ce phénomène caractéristique est appelé **cadence de fusion**. Musicalement, le vibrato n'existe qu'à cette cadence, et est jugé incorrect ou désagréable en dehors de ces limites. Les valeurs reconnues généralement les plus satisfaisantes sont 6 ou 7 Hz. Mais cela dépend évidemment de plusieurs facteurs, principalement du timbre (type d'instrument), du registre, et aussi du style de musique...

La profondeur de modulation varie surtout selon le type d'instrument : très petite pour la flûte traversière, mais jusqu'à un demi-ton et plus chez certains sopranos. A la cadence de fusion, la tonie du son correspond prend une valeur moyenne comprise dans l'aire de balayage du vibrato. Mais la hauteur est d'autant plus difficile à identifier avec précision que la profondeur de modulation est importante.

La sonie d'un son avec vibrato est plus grande que celle d'un son droit (c'est-à-dire sans vibrato). L'explication réside certainement dans le fonctionnement de la cochlée et dans la transmission du signal par le nerf auditif. Une fluctuation de fréquence excite deux points très rapprochés de la membrane basilaire ; à la cadence de fusion, les deux points se combinent et mettent en jeu un nombre accru de cellules de Corti pour la traduction d'une seule hauteur. Un phénomène analogue se produit dans le nerf auditif avec le recrutement des fibres nerveuses.

4.4.2. Aspects musicaux

Le vibrato, à l'origine simple ornement, a conquis dans la musique occidentale une importance considérable depuis le XIX^{ème} siècle. Il agrémente l'émission de toutes les notes de la plupart des instruments.

Les raisons d'un tel développement ne sont pas élucidées, mais ses propriétés psychoacoustiques suffisent à le justifier : il permet, comme nous l'avons vu, de gagner en niveau d'intensité subjective sans dépense d'énergie supplémentaire.

Mais surtout, de par sa nature fluctuante, il apporte à l'auditeur un élément de variété, et augmente la quantité d'information contenue dans un son. On comprend du même coup pourquoi le vibrato d'un instrument électronique ne peut remplir cette fonction : son absolue régularité le rend par là même totalement prévisible, c'est-à-dire non informatif. A l'inverse, un vibrato fortement irrégulier ou déréglé, donc très riche en information, peut gêner l'auditeur en retenant par trop son attention.

4.5. Hauteur et timbre

Nous avons déjà étudié, avec la hauteur formantique, comment les composantes du timbre pouvaient agir sur la sensation de hauteur. Les

sons paradoxaux en ont fourni un bon exemple. Il s'agit maintenant d'observer quelques conséquences de cette interférence sur la pratique musicale.

L'éloignement modifie le timbre : les harmoniques aigus d'un spectre sont plus fortement absorbés que les graves, et cela peut entraîner par contre-coup un abaissement de la tonie. De tels phénomènes se rencontrent dans les théâtres, quand des choristes ou des instrumentistes jouent dans les coulisses ou derrière la scène pour créer un effet de distance : les problèmes de justesse sont alors épineux...

L'effet d'absorption des aigus est similaire avec les choeurs à bouches fermées, ou avec certains décors peu réfléchissants, comme les rideaux, les tentures, etc.

CHAPITRE XIV

LA SENSATION D'INTERVALLE

1. Intervalles mélodiques

1.1. Seuil de perception différentiel des intervalles

L'oreille est capable de discerner de très petits intervalles, mais ses performances dépendent essentiellement de la fréquence. Dans les meilleures conditions, c'est-à-dire à des intensités moyennes, et dans une bande de fréquence comprise entre 500 et 2000 Hz, sa précision est supérieure à 3/1000ème. Cela signifie qu'une personne entraînée peut entendre un intervalle de rapport 1003/1000 ou 2006/2000 Hz, ce qui correspond à un peu plus de 1 savart, ou à 5 cents.

Toutefois la précision décroît dès que l'on s'écarte de la zone sensible, aussi bien vers les graves que vers les aigus : elle est de 5/1000ème à 100 Hz et à 7000 Hz, et tombe à 10/1000ème à 50 Hz et à 10 000 Hz, soit 4,3 σ ou 17 cents.

1.2. Altération de la perception des intervalles

Les intervalles mélodiques sont sujets à des distorsions de perception particulières qui dépendent du contexte musical. D'autre part, l'appré-

ciation de la justesse d'un intervalle est fonction de la mémoire et de l'acquis culturel.

1.2.1. L'attraction

L'attraction donne la sensation qu'une note est attirée par une autre, par exemple la sensible vers la tonique. Elle n'existe qu'en cas d'inégalité hiérarchique entre les degrés d'une échelle (par exemple la sensible vers la tonique dans le système tonal).

Cette impression, totalement culturelle, ne doit rien à une quelconque attirance physique ou prétendument naturelle. Il existe en effet dans d'autres cultures des échelles semblables à notre gamme majeure où le 7ème degré n'est pas considéré comme sensible et ne monte pas vers la tonique.

En cas d'attraction, l'oreille devient très peu exigeante sur la précision de l'intervalle concerné. Dans des situations musicales réelles, des demi-tons de sensibles peuvent rétrécir jusqu'à 80, 70, et même 60 cents sans que l'auditeur en soit conscient. Une musique jouée de cette façon paraîtra « tendue » mais certainement pas fausse. Les instruments dont les hauteurs ne sont pas fixées utilisent — plus ou moins volontairement — cette possibilité à des fins expressives en rapport avec le contexte musical.

1.2.2. La tolérance

La tolérance est l'accord de l'oreille sur une note perçue comme étrangère au système utilisé, c'est-à-dire la faculté de pouvoir substituer mentalement une note juste à une note fausse ; c'est une activité consciente, du moins dans un premier temps, avant qu'un automatisme n'en prenne éventuellement le relais.

La tolérance est aussi importante que l'attraction. Au-delà de son aspect anecdotique, comme de prendre malgré tout du plaisir à jouer sur un piano dont l'accord laisse quelque peu à désirer, elle abandonne une certaine marge d'erreur aux interprètes qui, heureusement, n'ont pas la précision des générateurs électroniques. Certaines limites ne doivent cependant pas être dépassées, comme nous allons le constater.

La tolérance a joué historiquement un rôle considérable, aux époques de changement de tempérament, cela particulièrement du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle[1]. A lire les écrits des musiciens sur ce sujet, on constate que nos prédécesseurs avaient l'ouïe extrêmement fine en matière d'intervalles, et qu'il leur fallait beaucoup d'efforts pour s'habituer à un nouveau système.

1.2.3. L'équivoque

L'équivoque apparaît quand la tolérance ne joue plus. Lorsqu'une note est trop éloignée de sa hauteur normale, on ne peut lui substituer sa valeur d'origine. C'est le cas des fausses notes, du doigt qui accroche la touche voisine, mais là n'est pas l'essentiel.

Il existe des intervalles qui nous paraissent faux, complètement étrangers à notre système musical : c'est le cas, par exemple, de la *tierce neutre*, exact milieu de la quinte. Pour une oreille occidentale, cet intervalle est difficile à entendre et à chanter, car nous ne l'avons pas en mémoire ; selon l'humeur ou le contexte, il sera perçu comme tierce majeure trop basse ou tierce mineure trop haute. Pourtant la tierce neutre existe dans d'autres cultures, et ne pose pas de problèmes particuliers d'intonation aux musiciens arabes, iraniens ou turcs qui la pratiquent dans plusieurs de leurs modes.

---

1 Cf. chapitre XV.

C'est pour cette raison qu'un effort est parfois nécessaire dans un premier temps pour ne pas trouver faux, par exemple, les tons issus de la division de l'octave en 5 ou 7 parties égales qu'utilise la musique savante du Sud-Est asiatique. Il est clair qu'entendre faux de tels intervalles, c'est plaquer un système inadéquat, en l'occurrence notre tempérament égal, sur un autre, c'est utiliser une mauvaise grille d'analyse.

2. Intervalles harmoniques

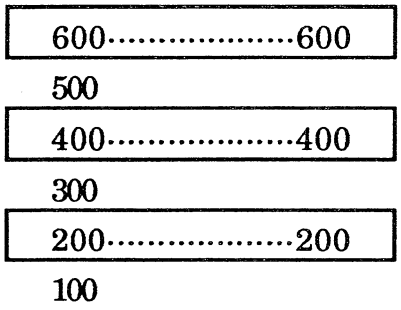
La perception des sons simultanés met en évidence des problèmes spécifiques liés à des phénomènes de fusion et de combinaison, et ne se pose pas dans les mêmes termes que pour les sons successifs. Ainsi, grâce aux battements, la perception différentielle des intervalles harmoniques est-elle d'une extraordinaire précision.

2.1. Consonance et dissonance

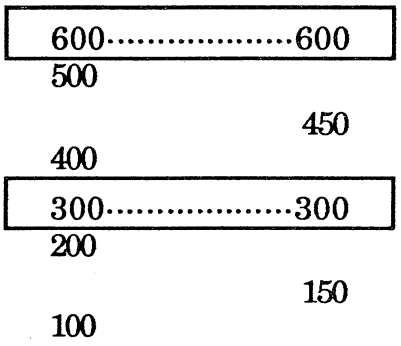
Si les notions de consonances et de dissonances nous sont familières, il n'est pas pour autant aisé de les définir, même dans l'état actuel de nos connaissances.

2.1.1. Théorie de Helmholtz

Au milieu du XIX^{ème} s., Helmholtz a proposé une explication de la consonance entre deux sons par l'évaluation du nombre des harmoniques communs à leurs spectres. Soit par exemple un intervalle d'octave :



Tous les harmoniques du son de 200 Hz ont un équivalent dans celui de 100 Hz : le taux de consonance est de 100 %. Avec un rapport de quinte :



un harmonique sur deux du son le plus aigu est commun avec ceux du plus grave : le taux de consonance de la quinte est de 50 %.

Helmholtz montrait de façon analogue que la quarte est consonante à 33 %, et que la tierce majeure, dont les spectres ont en commun un harmonique sur quatre, l'est à 25 %. Il est logique que l'impression de consonance ou de dissonance soit plus prononcée pour les intervalles harmoniques que pour les sons successifs, par suite de l'effet de fusion qui découle des composants communs.

2.1.2. Données actuelles

Un certain nombre d'arguments s'opposent à la théorie de la consonance de Helmholtz . Tout d'abord, deux sons sinusoïdaux dans des rapports de quinte, de quarte ou de tierce sont consonants et n'ont cependant par définition aucun harmonique commun. Il est possible

toutefois que le système auditif crée des harmoniques[1], et qu'un son pur y subisse une distorsion qui l'enrichit.

D'autre part, aucun des intervalles utilisés dans le tempérament égal, à l'exception de l'octave, ne correspond à un rapport harmonique simple, c'est-à-dire qu'aucun n'est strict. Dans ce cas, les intervalles n'ont pas d'harmoniques communs, ce qui n'empêche pas certains d'entre eux d'être perçus comme consonants.

Un dernier argument, enfin, tend à relativiser cette théorie séduisante mais tout de même assez rigide, en ce qu'elle prétend expliquer entièrement un phénomène subjectif par des données mathématiques. Les intervalles n'ont pas toujours provoqué les mêmes sensations toutes les époques. S'il est vrai qu'au Moyen Age seuls étaient considérés comme consonants les rapports d'octave, de quinte et de quarte, qui peut affirmer aujourd'hui que la tierce majeure est deux fois plus dissonante que la quinte ? Comment ne pas considérer ces notions comme relatives et évolutives ? L'histoire de l'harmonie est là pour répondre.

La théorie de la consonance de Helmholtz n'est certainement pas sans fondement, mais doit être ré-interprétée à la lumière de l'expérience musicale historique, et complétée par des expériences nouvelles en liaison avec la psychoacoustique moderne.

2.2. Les sons subjectifs

Les sons subjectifs sont créés par le système auditif dans certaines conditions et sont liés à la perception de la hauteur spectrale, que nous avons déjà analysée. Ils apparaissent à la fois par différences et par sommes de leurs composants.

---

[1] Cf. p. 130.

2.2.1. Sons soustractifs

Lorsque deux sons purs — ou presque purs — sont superposés, il est possible d'entendre distinctement un troisième son, dont la fréquence est égale à la différence des deux premiers. Par exemple, en superposant les fréquences 1200 Hz et 1600 Hz, on entend 400 Hz : ce son, appelé **soustractif** parce que obtenu par différence, est subjectif, reconstitué par le système auditif.

L'oreille traite en fait les deux sons en combinaison comme deux harmoniques consécutifs de rangs 3 et 4 d'un son de 400 Hz dont elle restitue le fondamental. Il est possible de le vérifier en intercalant entre les deux premiers sons un troisième, de fréquence 1400 Hz : le fondamental octavie alors vers le grave et passe à 200 Hz, les trois fréquences génératrices représentant cette fois les harmoniques 6, 7 et 8 du fondamental subjectif.

Les rapports de fréquence entre les sons de combinaison ne semblent toutefois pas déterminants. L'expérience montre que si l'on superpose les fréquences 1500 et 1700 Hz, on peut obtenir un son soustractif de 200 Hz, alors même que les deux composants ne sont pas des multiples entiers de rangs consécutifs de la fréquence résultante. Le son soustractif est dans ce cas moins intense, mais peut tout de même être clairement perçu, précisément dans la mesure où il fusionne moins avec les deux fréquences génératrices que s'il apparaissait comme composant harmonique.

Les sons soustractifs sont surtout perceptibles avec des sinusoïdes ou des spectres pauvres en harmoniques, mais en réalité le phénomène existe presque toujours, car les composants des sons riches se combinent entre eux.

Les musiciens ont constaté depuis longtemps l'existence des sons différentiels. Le violoniste Tartini et l'organiste allemand Sorge au

XVIII^{ème} s. sont parmi les premiers à s'y être intéressés. Les facteurs d'orgue utilisent les différentiels dans certains jeux pour éviter l'emploi de tuyaux de trop grande taille qui sont en outre très coûteux. Le son grave est alors réalisé au moyen de tuyaux plus petits, accordés sur ses harmoniques 2 et 3 ; le son résultant peut être renforcé par l'adjonction de tuyaux encore plus petits donnant les harmoniques aigus, comme dans les fournitures. Mais le timbre n'a évidemment pas la plénitude ni la consistance dans le grave d'un véritable 32 pieds.

2.2.2. Sons additionnels

En même temps que les sons soustractifs, il existe des sons additionnels de fréquence N_A tels que $N_A = N_1 + N_2$. Les conditions de leur apparition sont les mêmes que pour les sons différentiels, mais leur présence est surtout théorique, car ils sont pratiquement inaudibles, peut-être pour des raisons physiologiques, l'oreille étant moins sensible à ce phénomène.

3. Justesse et accordage

3.1. Qu'est-ce que jouer juste ?

Les divergences constatées entre hauteur physique et hauteur subjective prennent toute leur valeur avec le problème de la justesse musicale.

Une polémique éclata au début du siècle parmi les professeurs d'instruments à archet du Conservatoire de Paris, les uns prônant la « justesse expressive », c'est-à-dire l'adaptation des intervalles aux nécessités du contexte musical, les autres le strict respect du tempérament égal, seule référence valable à leurs oreilles. Un tel débat

est aujourd'hui dépassé, et le point de vue des premiers s'est heureusement imposé.

Un interprète, même s'il le veut (ou le croit), ne peut reproduire exactement les hauteurs écrites sur une partition sans une marge de tolérance. Une étude menée aux États-Unis voici quelques dizaines d'années a montré que des chanteurs professionnels de haut niveau n'atteignent jamais la hauteur théorique pour 1/4 des notes, et que pour les 3/4 restants elle n'est réalisée que pour de courts instants[1]. Des analyses statistiques plus récentes, toujours effectuées à partir de prestations de grands chanteurs, ont chiffré à ± 15 cents l'erreur de hauteur dans le cas de chant accompagné, et à près de 60 cents pour un intervalle de quinte sans accompagnement ; les écarts s'accentuent encore avec les fluctuations de l'intensité, ainsi que pour les notes très brèves.

La situation est la même pour la musique instrumentale, mais tous les instruments n'ont pas le même statut, et il existe d'importantes variations d'une famille à l'autre. Les différences relevées sont généralement moins importantes que pour la voix, sauf en cas d'attraction ou d'intentions expressives accentuées.

L'usage du vibrato, plus ou moins profond, vient encore éloigner la justesse musicale de la hauteur théorique. Mais la tolérance de l'oreille intervient tant que ces fluctuations ne dépassent pas des limites qui varient elles-mêmes avec plusieurs facteurs, et en premier lieu avec chaque individu. D'autre part, il est prouvé expérimentalement qu'une exécution musicale avec des valeurs acoustiquement exactes n'apporte pas systématiquement de satisfaction supplémentaire aux auditeurs. On

---

[1] C. Seashore, "Forms of artistic pitch deviations in singing", *Psychological Bulletin*, Princeton, 677, 1934.

ne voit d'ailleurs pas quelle fonction du système auditif présenterait une telle exigence.

3.2. Problèmes d'accordage

Indépendamment des impératifs de justesse au cours de l'exécution musicale, l'accord même de certains instruments pose problème, tant pour des questions de facture qu'à cause des techniques utilisées.

3.2.1. Instruments à cordes

D'une façon générale, les cordes sont rarement au tempérament égal, étant accordées par suppression des battements sur les quintes, c'est-à-dire au rapport 3/2 strict : d'où leur réputation bien établie, et mainte fois vérifiée[1], de jouer selon la justesse pythagoricienne (cf. chap. XV).

La justesse des cordes frottées dépend aussi de la pression, plus ou moins importante, exercée par l'archet : l'écart peut dépasser 1,5 %. L'action des doigts qui pincent et tirent les cordes augmente leur tension, donc leur fréquence. Un sonagramme de harpe, par exemple, montre clairement une déviation de hauteur au moment de l'attaque.

3.2.2. Le cas du piano

La présence simultanée, avec le piano, de registres très grave et très aigu entraîne des complications liées à la distorsion de la sensation d'intervalle dans les extrêmes du spectre. Si, dans ces zones, l'accord

---

[1] Cf. par exemple G. Van Esbroek et G. Monfort, *Qu'est-ce que jouer juste ?*, Bruxelles, 1946.

respectait les valeurs théoriques du tempérament égal, les notes aiguës paraîtraient trop basses, et les notes graves trop hautes (cf. p. 199).

Les cordes d'un piano à queue sont plus longues, et rayonnent plus d'énergie dans le grave, à fréquence égale, que celles d'un piano droit : pour que leur tonie soit la même, ces deux instruments ne doivent pas être accordés à la même fréquence sur toute leur étendue.

En ne réglant pas rigoureusement à la même hauteur les cordes doubles ou triples d'une note médium ou aiguë, les accordeurs introduisent un battement très lent, à peine perceptible, dont l'intérêt est de faire « vivre » cette note[1].

L'accord d'un piano n'est donc pas une chose aisée, et la subjectivité, les « recettes » personnelles, l'expérience, y tiennent une grande part. C'est ce qui explique l'échec de l'accordeur électronique, qui fournit des fréquences calculées théoriquement sans tenir compte des impondérables de la tonie.

3.2.3. Instruments à vent

Au contraire des cordes qui baissent lorsqu'elles se détendent, les instruments à vent ont tendance à monter quand la température de l'air augmente, ce qui ne manque pas de se produire en cours de jeu.

Certains instruments, de par leur facture ou leur conception, ne sont pas rigoureusement justes sur toute leur étendue. La flûte traversière, par exemple, est légèrement trop basse dans le registre grave, et trop aiguë dans la troisième octave. Les bons musiciens corrigent — parfois sans s'en rendre compte — cet écart par la position des lèvres sur l'embouchure. Les cuivres utilisent quant à eux la division de la colonne

---

[1] G. Weinreich, "Comment vibrent les cordes d'un piano ?", *Sons et musique*, trad. fr. Paris, 1980.

d'air pour produire les différents partiels et ne peuvent du même coup sonner tout à fait juste dans le tempérament égal, relativement éloigné des valeurs naturelles fournies par le tuyau.

Loin de constituer un handicap, la plupart de ces phénomènes contribuent à enrichir ou à mettre en valeur des timbres qui, sans cela, seraient peut-être moins bien perçus et perdraient de leur originalité en se fondant totalement dans l'ensemble orchestral.

CHAPITRE XV

LE TEMPÉRAMENT DES ÉCHELLES MUSICALES

1. Introduction

Réaliser un tempérament, c'est déterminer la valeur de tous les intervalles d'une échelle sonore en conférant à chaque degré une hauteur théorique. Cette opération est implicite ou explicite, mais toujours sous-jacente à la pratique musicale, aucune musique au monde n'utilisant la totalité des sons qu'elle peut produire ou dont elle dispose.

Des choix sont donc effectués, qui peuvent influencer en retour le style musical, parfois conditionner l'évolution même du langage. Ceci est particulièrement vrai pour la musique occidentale, dont les préoccupations en matière de tempérament représentent une large part de l'histoire théorique.

2. Le tempérament pythagoricien

2.1. Construction

De tous les tempéraments, le système pythagoricien est le plus ancien, et celui qui fut le plus longtemps en usage, de l'Antiquité grecque à la fin du Moyen Age. Une telle longévité montre assez que ses qualités

musicales étaient nombreuses, et son esprit est toujours présent dans la justesse de certains instruments à cordes (cf. chap. XIV).

2.1.1. Le cycle des quintes

En enchaînant à la suite 12 intervalles de quintes, on obtient les 12 notes de la gamme pythagoricienne. Il est d'usage de démarrer le cycle sur la note fa pour qu'apparaissent en premier les degrés sans altération, mais n'importe quelle note peut évidemment servir de point de départ :

fa do sol ré la mi si
fa# do# sol# ré# la# mi#

La première ligne fournit le genre diatonique, la seconde le genre chromatique, et en poussant au delà du mi#, on obtiendrait le genre enharmonique de la théorie grecque. Les cinq premières quintes fournissent en outre les degrés de base du système pentatonique, largement utilisé par les musiques ethniques, et étudié sur le plan théorique de manière approfondie par les Chinois.

2.1.2. Le comma pythagoricien

En partant de fa, on parvient après 12 quintes sur mi#, qui, enharmoniquement, devrait se confondre avec le point de départ. Or ce n'est pas le cas, ce mi# est légèrement plus haut, toutes octaves réduites, que le fa. Cela se montre aisément par le calcul. Additionner 12 quintes, c'est multiplier 12 fois le rapport 3/2 par lui-même, en franchissant du même coup 7 octaves. Arithmétiquement, il est clair que :

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} > 2^7$$

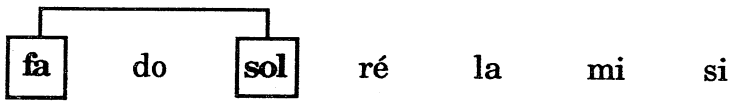
La différence entre mi# ($3/2^{12}$) et fa (2^7) a pour valeur :

$$\frac{\log \frac{129,746}{128}}{\log 2} \times 1200 = 23,5 \text{ cents}$$

soit un **comma pythagoricien**. Le cycle ne se referme pas sur lui-même, de sorte qu'il serait plus juste de parler de « spirale des quintes », se poursuivant à l'infini. Ce point d'une grande importance est à l'origine, ainsi que nous le verrons, du développement des tempéraments à partir de la Renaissance.

2.2. Calcul des intervalles

Dans le système pythagoricien, tous les intervalles se calculent à partir du cycle des quintes. Le principe en est toujours le même : le nombre de quintes franchies pour parvenir à la note cherchée exprime son rapport, après réduction éventuelle des octaves. Par exemple, la 2de majeure :



L'intervalle fa-sol représente 2 quintes, soit :

$$(\frac{3}{2})^2 = \frac{9}{4}$$

Comme 1 octave a été franchie, il faut abaisser le sol d'autant :

$$\frac{9}{4} \div 2 = \frac{9}{8}$$

C'est la valeur du ton pythagoricien. Quelles que soient les notes choisies, par exemple do-ré ou sol-la, le rapport aurait toujours la même valeur. Pour la 3ce majeure, nous obtenons :

$$(\frac{3}{2})^4 = \frac{81}{16}$$

avec un franchissement de 2 octaves qu'il faut réduire :

$$\frac{81}{16} \div 2^2 = \frac{81}{64}$$

Cette tierce contient naturellement 2 tons pythagoriciens. En effet :

$$(\frac{9}{8})^2 = \frac{81}{64}$$

Les demi-tons apparaissent de façon similaire, et non par division du ton. On peut vérifier que les demi-tons diatoniques et chromatiques ne sont pas égaux, puisqu'ils ne représentent pas le même nombre de quintes. Le demi-ton diatonique, ou *limma*, a pour rapport :

$$(\frac{3}{2})^5 \div 2^3 = \frac{243}{256}$$

ou 256/243 pour le limma ascendant (mi-fa). Le demi-ton chromatique (fa-fa# par exemple), appelé *apotome*, vaut quant à lui :

$$(\frac{3}{2})^7 \div 2^4 = \frac{2187}{2048}$$

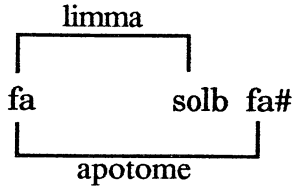
Le calcul indique que le limma est plus petit que l'apotome, le premier valant 90 cents, et le second 114 cents : leur différence est d'un comma pythagoricien. Le ton, contenant les deux sortes de demi-tons, vaut donc 204 cents, et la tierce majeure le double, soit 408 cents.

2.3. Valeur musicale

2.3.1. Caractère mélodique

La valeur des différents intervalles d'un système induit et détermine des qualités musicales spécifiques. Dans le tempérament pythagoricien, les tons larges et le demi-ton diatonique plus petit que le demi-ton chromatique confèrent aux mouvements mélodiques une tension caracté-

ristique, par attraction naturelle, car inscrite structurellement dans les intervalles. Le dièse est plus haut que le bémol :



2.3.2. Le problème de la tierce harmonique

Ce tempérament convient parfaitement à l'expression mélodique, notamment à celle du Moyen Age, dont il respecte le caractère tendu et attractif. Cependant, la tierce majeure n'est pas stricte et présente des battements lorsqu'elle est utilisée harmoniquement. Calculons la différence entre les tierces majeures pythagoricienne et naturelle :

P : do sol ré la mi(+) $(\frac{3}{2})^4 = \frac{81}{16}$

N : do do do mi $2^2 \times \frac{5}{4} = \frac{80}{16}$

L'intervalle entre les deux mi est de :

$$\frac{\log \frac{81}{80}}{\log 2} \times 1200 = 21{,}5 \text{ cents}$$

Cette valeur est appelée **comma syntonique** (ou comma majeur). Il est probable que le caractère dissonant dû aux battements de la tierce pythagoricienne ait été un obstacle à son assimilation comme consonance parfaite : chez Josquin des Prés, au début du XVI^{ème} siècle, encore 50 % environ des cadences finales ne comportent pas de tierce. En fait, cet intervalle n'a jamais été véritablement toléré, et les musiciens de la Renaissance, stimulés par les progrès de l'harmonie et l'affirmation de la tonalité naissante, ainsi que par l'essor des instruments à clavier, plutôt

qu'accepter ces battements dans leurs accords parfaits, ont préféré bouleverser leurs habitudes, et changer de tempérament.

3. Les tempéraments inégaux

3.1. Le tempérament zarlinien

Le seul grief sérieux retenu contre le tempérament pythagoricien est finalement sa tierce majeure peu convenable à l'harmonie. C'est pourquoi les théoriciens de la Renaissance, et au premier rang d'entre eux le Vénitien Gioseffo Zarlino (1517-1590), imaginèrent une nouvelle échelle dont l'ossature serait fournie par le cycle des quintes, à l'exception des tierces qui proviendraient directement de la série harmonique[1].

3.1.1. Construction

Sur la note do prise comme point de départ, on construit symétriquement deux quintes, une ascendante et une descendante (en fait une quarte ascendante) ; sur les degrés fa et sol obtenus, on place à nouveau deux quintes pour obtenir les degrés do (déjà présent) et ré. Ces trois accords de quinte à vide sont enfin complétés par des tierces strictes, c'est-à-dire de rapport 5/4 :

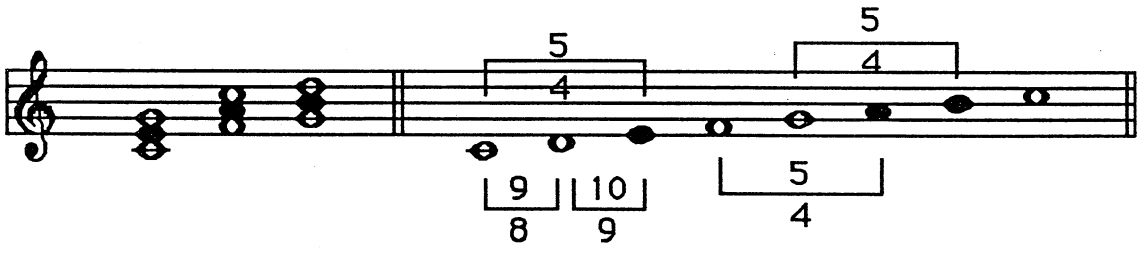


Fig. 66 : le tempérament zarlinien

[1] G. Zarlino, *Istitutioni Harmoniche*, Venise, 1558.

Pour les distinguer, les degrés d'origine pythagoricienne obtenus par le cycle des quintes sont écrits en rondes, les degrés provenant de la série harmonique en notes noircies.

La gamme de Zarlino est fondamentalement différente de celle de Pythagore en ce qu'elle introduit une inégalité entre des intervalles de même nature, comme le montre un examen de sa structure.

La 3ce do-mi vaut par définition 5/4, et le ton do-ré, obtenu par superposition de deux quintes, 9/8 ; il est clair que le ton ré-mi ne peut avoir la même valeur que do-ré sous peine de constituer à nouveau une 3ce pythagoricienne. Pour connaître le rapport de cette 2de majeure, il suffit de retrancher de la 3ce la valeur du ton pythagoricien, ce qui donne :

$$\frac{5}{4} \div \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$$

La 3ce majeure zarlinienne comprend donc deux sortes de tons : un *ton majeur* à 9/8 valant 204 cents, et un *ton mineur* (à ne pas confondre avec une 2de mineure) à 10/9 qui vaut 182 cents. La différence entre ces deux tons est par conséquent d'un comma syntonique (cf. supra). La 3ce mineure s'obtient en retranchant la 3ce majeure de la 5te :

$$\frac{3}{2} \div \frac{5}{4} = \frac{6}{5}$$

La présence de deux tons différents implique quatre sortes de demi-tons : au *limma* et à l'*apotome* issus du ton pythagoricien à 9/8 s'ajoutent les demi-tons provenant du ton mineur zarlinien à 10/9. Ils se calculent exactement comme les autres intervalles. Le demi-ton diatonique se trouve entre la 3ce majeure et la 4te juste :

$$\frac{4}{3} \div \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$$

Ce demi-ton est appelé *diaton naturel* (ou demi-ton majeur), et vaut 112 cents ; le demi-ton chromatique (10/9 ÷ 16/15 = 25/24), appelé *chromate* (ou demi-ton mineur), vaut 71 cents. La différence entre les deux, le

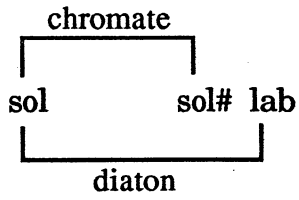
comma enharmonique, qui mesure 41 cents, est nettement plus importante (presque le double) qu'entre les deux demi-tons pythagoriciens.

3.1.2. Valeur musicale

Le système zarlinien est d'une grande complexité, ce qui le rend difficilement exploitable, surtout pour l'accord des instruments clavier. Par exemple, le la considéré comme 5te de ré ne correspond pas au rapport strict 3/2 : il ne saurait donc être à la même hauteur que le la pris comme 3^{ce} de fa, ce qui implique deux touches pour le même nom de note.

La transposition rigoureuse est parfois impossible, du fait de la disposition des intervalles. Entre les tonalités d'ut et de sol, par exemple, la succession des tons majeurs et mineurs n'est pas identique : en ut, un ton majeur se situe entre la tonique et le deuxième degré, un ton mineur entre le deuxième et le troisième degré, alors qu'en sol, c'est le contraire.

Les difficultés pratiques deviennent inextricables avec l'utilisation du chromatisme, et nous n'entrerons pas dans les détails. Remarquons seulement que du fait que le diaton est plus grand que le chromate, le bémol est plus haut que le dièse dans la gamme de Zarlino :



Un tel tempérament confère à la musique un caractère plutôt statique dans le diatonisme, mais au contraire très dynamique et tendu avec le chromatisme.

3.2. Les tempéraments à l'époque baroque

3.2.1. Principes de base

L'introduction de la tierce naturelle dans le système pythagoricien présente donc en pratique des difficultés considérables. C'est pourquoi, dès le début de la période baroque, les théoriciens ont réalisé des tempéraments certes inspirés des considérations de Zarlino, mais dans un esprit pragmatique, le but recherché étant d'accorder de manière satisfaisante les instruments à sons fixes. D'une façon générale, les systèmes proposés apparaissent toujours comme des compromis entre deux exigences incompatibles entre elles : d'un côté, offrir le plus possible d'intervalles stricts, de l'autre, disposer d'un maximum de tonalités exploitables.

Toute la problématique des tempéraments inégaux tourne autour de cette contradiction, le « compromis » consistant à altérer dans une mesure plus ou moins acceptable par l'oreille tel ou tel intervalle, afin de gagner quelques possibilités de modulation ou de transposition. On comprend alors pourquoi les solutions sont nombreuses — on les compte par dizaines — imparfaites par nature, mais stimulantes pour l'imagination des théoriciens et l'oreille des compositeurs...

3.2.2. Exemples de tempéraments inégaux

Le plus important d'entre eux fut probablement le tempérament **mésotonique** à 8 tierces égales. Son principe consiste à accorder sans battements 8 tierces majeures au détriment des quintes qui sont quant à elles légèrement raccourcies ; le déficit ainsi accumulé est reporté sur la quinte sol#-mib, de ce fait absolument inutilisable, et surnommée pour cette raison « quinte du loup ».

Jean-Jacques Rousseau a décrit en 1767 un autre tempérament, dérivé du mésotonique, mais qui altère très légèrement les tierces strictes et autorise à ce prix presque toutes les tonalités. Il est instructif d'en étudier la réalisation pratique à partir du texte original, à savoir l'article "tempérament" du *Dictionnaire de Musique* : cela donne une idée précise de la manière dont les théoriciens procédaient à l'époque, et montre à la fois le mélange d'empirisme et de précision qui caractérise l'accord d'un clavier :

> "1° On commence par l'*ut* du milieu du clavier, et l'on affoiblit les quatre premières quintes en montant jusqu'à ce que la quatrième *mi* fasse la tierce majeure bien juste avec le premier son *ut* ; ce qu'on appelle la première preuve. 2° En continuant d'accorder par quintes, dès qu'on est arrivé sur les dièses, on renforce un peu les quintes, quoique les tierces en souffrent ; et quand on est arrivé au *sol* dièse, on s'arrête : ce *sol* dièse doit faire avec le *mi* une tierce majeure juste ou du moins souffrable ; c'est la seconde preuve. 3° On reprend l'*ut* et on accorde les quintes au grave, savoir, *fa*, *si* bémol, etc., foibles d'abord puis les renforçant par degrés, c'est-à-dire affoiblissant les sons jusqu'à ce qu'on soit parvenu au *re* bémol, lequel, pris comme *ut* dièse, doit se trouver d'accord et faire quinte avec le *sol* dièse auquel on s'était ci-devant arrêté ; c'est la troisième preuve. Les dernières quintes se trouveront un peu fortes, de même que les tierces majeures ; c'est ce qui rend les tons majeurs de *si* bémol et de *mi* bémol sombres et même un peu durs : mais cette dureté sera supportable si la partition est bien faite (...) Les organistes et les facteurs regardent ce *tempérament* comme le plus parfait que l'on puisse employer".

3.2.3. Valeur musicale

Les musiciens des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle ont su tirer parti de l'inégalité des intervalles et des caractères spécifiques qu'elle confère aux différentes tonalités. Rousseau commente, à propos de son tempérament :

> "les tons naturels jouissent par cette méthode de toute la pureté de l'harmonie, et les tons transposés, qui forment des modulations moins fréquentes, offrent de grandes ressources au musicien, quand il a besoin d'expressions plus marquées".

Rameau, pour une fois d'accord avec Rousseau, écrit pour sa part :

> "les habiles Musiciens sçavent profiter à propos de ces differens effets des Intervalles, & font valoir par l'expression qu'ils en tirent, l'alteration qu'on pourroit y condamner"[1].

Nous reviendrons sur ce sujet plus longuement, avec l'ethos des tonalités.

4. Le tempérament égal

Face aux complications entraînées par tous les tempéraments inégaux quels qu'ils soient, le tempérament égal propose une méthode radicalement différente : la division de l'octave en *n* parties égales, abandonnant la justesse naturelle, et acceptant les battements qui se produisent inévitablement dans tous les intervalles de la gamme, octave exceptée.

---

[1] J.-P. Rameau, *Nouveau Système de Musique Theorique*, Paris, 1726, chap. XXIV.

4.1. Perspective historique

Une erreur d'appréciation largement répandue, ou plus probablement une méconnaissance des faits réels, conduit certains à présenter cette démarche non seulement comme un progrès décisif de l'histoire de la musique, mais comme une découverte providentielle de la fin du XVII^{ème} siècle, dans laquelle se seraient engouffrés avec enthousiasme les compositeurs et leurs interprètes.

La réalité est différente, et si ce n'était le cas, on serait en droit de s'étonner que des théoriciens susceptibles d'inventer les systèmes si compliqués de la Renaissance et de l'époque baroque n'aient pas été capables d'imaginer une solution aussi simple dans son principe.

L'idée de diviser l'octave en 12 parties égales est en fait ancienne : elle est notamment attestée en Chine dès le XVI^{ème} siècle. mais il ne s'agit que de spéculations abstraites et l'accord ne fut pas réalisé en pratique. En Occident, Michael Prætorius (v. 1571-1621) indique en 1619 que la division du manche de la viole de gambe et du luth donne des demi-tons égaux[1]. Marin Mersenne (1588-1648) confirme ce fait et en donne un calcul très précis[2]. Mais il précise toutefois :

> "Je ne sçache personne que le sieur Gallé qui ayt accomodé cet accord à l'orgue et à l'épinette (...) les Quintes sont si peu diminuées, qu'il n'est pas quasi possible de les distinguer d'avec les justes : n'y ayant que les Tierces majeures trop fortes d'un peu plus que d'un demy comma ; ce qui blesse l'oreille de nos Praticiens, qui ne l'ont pas accoustumée à cet accord (...) Les demi-tons égaux ont aussi ésté jugés trop petits pour faire les cadences agréables (...) Il est certain que l'Orgue et l'Epinette estans tempérées selon le manche des Luths et des Violes, les concerts qui en réussiront, paroistront plus

---

1 M. Prætorius, *Syntagma musicum*, 1619, Livre II, *De Organographia*, chap. XL.
2 M. Mersenne, *Harmonie Universelle*, 1636, *Livre premier*, Proposition XIV.

> justes, à raison de la convenance de leurs accords. Mais nos Praticiens ne sont pas d'avis de changer l'accord de l'Epinette, pour la contraindre à l'accord du Luth, de peur de quitter la perfection de leurs Tierces, et de leurs demi-tons, qui font l'une des plus grandes beautés, et variétés de la Musique"[1].

Ce texte montre clairement que le tempérament égal était connu au début du XVII^{ème} s., utilisé par les instruments à cordes pincées et frottées, et rejeté pour les instruments à clavier par la plupart des musiciens.

4.2. Le tempérament égal à 12 demi-tons égaux

Le tempérament égal actuel a été complètement décrit par Johann Georg Neidhart (v. 1685-1739) en 1732[2] : il consiste tout simplement en la répartition régulière du comma pythagoricien sur les 12 quintes. Mathématiquement, cela donne :

$$\sqrt[12]{2} = 1{,}059463$$

ce qui peut aussi s'écrire : $2^{1/12}$.

Ce résultat représente la valeur par laquelle il faut multiplier (ou diviser) une fréquence pour obtenir celle du demi-ton tempéré supérieur (ou inférieur). La quinte tempérée est peu éloignée de la quinte stricte, d'un *comma schisma* exactement, qui vaut 2 cents.

Tous les intervalles du tempérament égal peuvent se calculer à partir de la formule indiquée ci-dessus : soit sous forme de racine douzième de 2 élevée à la puissance n (nombre de demi-tons contenus

---

1 ibid., *Nouvelles observations*, 7ème observation.

2 J.G. Neidhart, *Gänzlich erschöpfte mathematische Abtheilungen des diatonisch-chromatischen temperirten Canonis monochordi*, Königsberg, 1724.

dans l'intervalle), soit sous forme de puissance fractionnaire du type $2^{n/12}$. Par exemple, la 3ce majeure, qui comprend 4 demi-tons, est égale à :

$$(\sqrt[12]{2})^4 = \sqrt[3]{2} = 2^{1/3} = 1{,}259921$$

$$\frac{\log 1{,}259921}{\log 2} \times 1200 = 400 \text{ cents}$$

Extraire la racine douzième d'un nombre n'est pas simple, et il fallut, pour un calcul précis, l'apparition de la première table de logarithme (calculée en 1588 par le Suisse Bürgi, mais publiée par Neper en 1614). Auparavant, on se servait d'une formule approchée mais facile à réaliser : le rapport 18/17, qui vaut 1,05882, soit un tout petit peu moins (1 cent) que la valeur exacte du demi-ton tempéré. Et la pression du doigt augmentant légèrement la tension de la corde, donc sa fréquence, on peut admettre que ce tempérament était parfaitement réalisé dans la pratique.

4.2.1. Valeur musicale

Le tempérament égal propose donc un compromis minimum en ce qu'il fausse tous les intervalles (à l'exception de l'octave) mais donne l'accès à toutes les tonalités. Il ne s'agissait donc pas d'un progrès, on l'a vu, mais d'une résignation rendue nécessaire par l'évolution du langage harmonique et du besoin ressenti par les compositeurs d'élargir l'horizon tonal. Les réticences furent nombreuses à l'adoption du nouveau système, pour les raisons déjà invoquées par Mersenne, particulièrement la fausseté des tierces. En France et en Allemagne, au cours du XVIIIème siècle., les orgues continuèrent souvent d'être accordées en mésotonique ; l'Angleterre se montra encore plus conservatrice et les tempéraments inégaux eurent droit de cité jusque dans la 2ème moitié du XIXème siècle.

Rameau, d'abord ardent défenseur du tempérament inégal, fait une volte-face spectaculaire, et préconise désormais la nouvelle formule :

> "Prenez telle Touche du Clavecin qu'il vous plaira, accordez-en d'abord la Quinte juste, puis diminuez-la si peu que rien, procédez ainsi d'une Quinte à l'autre, toujours en montant, c'est-à-dire du grave à l'aigu, jusqu'à la dernière, dont le Son aigu aura été le grave de la première, vous pouvez être certain que le Clavecin sera bien d'accord (...) Si le plus simple est le plus facile & le plus naturel, donc notre temperamment doit l'emporter sur celui qui est en usage ; & nous ne voïons pas quelle raison peut empêcher de l'adopter, puisque tout parle en sa faveur ; sa facilité, sa simplicité, sa justesse, surtout son rapport avec les Instruments sans Touches, comme le Violon qui sont les plus parfaits (...)"[1].

On appréciera au passage le « si peu que rien » qui côtoie, dans le traité de Rameau, d'austères formules arithmétiques permettant des calculs d'une précision supérieure au millième...

Mais plus encore que le défaut de justesse, c'est l'uniformité du système qui choquait le plus. Toutes les tonalités deviennent certes possibles mais sont identiques, perdant ainsi leur couleur propre, leur « énergique variété » selon l'expression de Rousseau.

4.2.2. Le *Wohltemperierte Klavier* de J.-S. Bach

C'est dans ce contexte qu'il convient d'évoquer l'oeuvre célèbre de J.-S. Bach. La musicologie moderne admet aujourd'hui sans conteste que, contrairement à la croyance courante, le *Clavier bien tempéré* n'a pas été écrit pour le tempérament égal, mais bel et bien pour un tempérament inégal.

Voyons les faits. Le titre, d'abord, est peu explicite : *wohl* ne signifie pas égal mais plutôt *à l'aise, dans lequel on se sent bien*. Et surtout

---

1 J.-P. Rameau, *Génération harmonique*, Paris, 1737, chap. VII.

l'expression *wohltemperiert* figure déjà dans le sous-titre du traité *Musikalische Temperatur* (1686) de Andreas Werckmeister (1645-1706), dont voici la traduction :

"*Instruction mathématique claire et véridique de la manière dont on peut accorder un clavier par l'enseignement du monocorde, en particulier les orgues, positifs, régales, épinettes et autres selon un bon tempérament*" (wohltemperiert).

Dans cet ouvrage, l'auteur indique plusieurs formules de tempéraments inégaux, bien connus des spécialistes l'heure actuelle, et baptisés selon l'usage Werckmeister I, II, III, etc.

Or, certains musicologues ont attribué la paternité du tempérament égal à Werckmeister, ce qui est inexact.; il est vrai toutefois que celui-ci en donne une description correcte et l'adopte définitivement, mais dans un autre traité, publié dix ans plus tard[1]. Le terme *wohltemperiert* n'y figure plus, et c'est sans doute l'origine de la confusion sur le titre de l'oeuvre de Bach.

D'autre part, l'opinion selon laquelle Bach aurait opté pour le tempérament égal ne repose que sur un seul et unique témoignage, celui de Friedrich Marpurg (1718-1795), grand admirateur et propagateur en Allemagne des idées de Rameau[2] qu'il connut à Paris en 1746, précisément à l'époque ou celui-ci s'était déjà rallié au tempérament égal.

Cette thèse a été combattue à l'époque par les propres fils de J.-S. Bach, notamment par Carl Philipp Emanuel[3], et par certains de ses élèves, au premier rang desquels Johann Philipp Kirnberger (1721-1783), théoricien et compositeur qui étudia avec Bach de 1739 à 1741. Dans son traité *Die Kunst des Reinen Satzes in der Musik* (1779) il affirme suivre

---

1 A. Werckmeister, *Hypomenata Musica*, Quedlindburg, 1697.
2 F. Marpurg, *Versuch über die musikalische Temperatur*, Breslau, 1776.
3 C.P.E. Bach, *Versuch über die wahre Art das Clavier zu spielen*, Berlin, ^{4}1787 [Essai sur la véritable manière de jouer du piano].

l'enseignement de son maître, déclare très mauvais le tempérament égal, et propose deux systèmes d'accord inégal connus aujourd'hui sous les noms de Kirnberger I et II. C'est probablement pour une formule de ce type qu'a été composé le *Wohltemperierte Klavier.*

Au reste, le caractère démonstratif de cette oeuvre n'aurait guère de sens s'il avait effectivement été écrit pour le système à 12 demi-tons égaux, puisque celui-ci altère la justesse de tous les intervalles pour permettre précisément ces possibilités. La démonstration prend en revanche toute sa valeur s'il s'agit d'un tempérament inégal, qui conserve un certain nombre de tierces strictes ou battant peu mais autorise les 24 tonalités majeures et mineures, comme c'est le cas avec le Werckmeister III... On comprend mieux ainsi pourquoi Bach revint sur ce problème vingt ans après le Premier cahier, et composa en 1742 une deuxième partie calquée sur le modèle de la première, probablement pour un tempérament proche du Kirnberger II.

Bach ne fut ni le premier ni le seul à écrire ce genre d'oeuvre à la fois didactique et théorique (même si la réussite de la sienne est incomparable...). Le musicologue André Pirro a montré que sur les 24 suites de J. Pachelbel, 17 se suivent dans l'ordre des tons majeurs et mineurs, les 7 manquantes correspondant aux tonalités les plus chargées en dièses ou en bémols ; l'*Ariadne Musica* (v. 1702) de J.-C. Fischer est conçue comme un fil qui guide les organistes dans le dédale d'une vingtaine de tonalités ; J. Mattheson propose dans son *Exemplarische Organistenprobe im Artikel vom General-Baß* paru en 1719 un modèle d'accompagnement pour toutes les tonalités. De tels exemples sont nombreux, surtout en Allemagne et en Italie.

Le *Wohltemperierte Klavier* a été joué (et enregistré) sur des clavecins accordés selon les tempéraments de Werckmeister et de Kirnberger : l'oeuvre sonne parfaitement bien, les différentes tonalités

n'ont pas le même caractère, et le contraste est renforcé entre les tons à dièses et à bémols, surtout avec les armatures chargées,

4.3. Le tempérament de Holder

Vers 1675, un certain Nicolas Mercator eut l'idée d'un tempérament égal, divisant l'octave non pas en 12 demi-tons, mais en 53 commas égaux. A sa suite, le théoricien anglais William Holder (1616-1697) en fournit les calculs complets[1]. L'expression numérique de ce comma s'écrit :

$$\frac{\sqrt[53]{2} = 1{,}01316}{2^{1/53}}$$

ou encore :

Le comma de Holder vaut 22,6 cents. Ce système ne fut jamais adopté en pratique, et il serait inutile de l'évoquer s'il ne se trouvait à la source d'une confusion très répandue : c'est dans ce système uniquement que le ton vaut 9 commas, divisé lui-même — en référence aux principes pythagoriciens — en un demi-ton diatonique à 4 commas, et un demi-ton chromatique à 5 ; une gamme majeure se compose de 5 tons + 2 demi-tons diatoniques soit 53 commas. Attribuer de telles valeurs au tempérament égal, comme le font parfois encore certains manuels de solfège ou de théorie musicale n'a aucun sens : le ton n'y vaut pas 9 commas, et les demi-tons diatoniques et chromatiques sont par définition égaux entre eux.

Cependant certains interprètes, comme les violonistes, les chanteurs, et d'une façon générale tous ceux qui « fabriquent » la hauteur, font la différence entre les dièses et les bémols, sont sensibles à l'attraction, etc. C'est tout simplement qu'ils ne jouent pas rigoureu-

---

[1] W. Holder, *A treatise on the Natural Grounds and Principles of Harmony*, Londres, 1694.

sement selon le tempérament égal, et qu'ils ne pourraient d'ailleurs pas le faire avec une précision parfaite (cf. chap. XII). Tant mieux pour la musique.

5. L'ethos des tonalités

5.1. Différentes appréciations

La principale caractéristique des tempéraments inégaux est donc d'ordonner des successions d'intervalles non-identiques selon les tonalités : les différentes gammes possèdent alors des couleurs variées et produisent des effets, des sentiments particuliers, un « ethos » spécifique.

Les Grecs déjà avait attribué un ethos à chacun de leurs modes et, probablement dans un esprit d'imitation, cette pratique se généralisa à la fin du XVII^{ème} siècle. Marc-Antoine Charpentier (v. 1634-1704) dépeint ainsi les caractères attachés aux différents tons[1] :

ut majeur	:	gai et guerrier
ut mineur	:	obscur et triste
ré majeur	:	joyeux et très guerrier
ré mineur	:	grave et dévot
mib majeur	:	cruel et dur
mib mineur	:	horrible, affreux
mi majeur	:	querelleux et criard
mi mineur	:	effemmé, amoureux et plaintif
fa majeur	:	furieux et emporté
fa mineur	:	obscur et plaintif
sol majeur	:	doucement joyeux
sol mineur	:	sérieux et magnifique

1 M.-A. Charpentier, *Règles de composition*, Paris, s.d.

la majeur	:	joyeux et champêtre
la mineur	:	tendre et plaintif
sib majeur	:	magnifique et joyeux
sib mineur	:	obscur et terrible
si majeur	:	dur et plaintif
si mineur	:	solitaire et mélancolique

On constate que Charpentier ne cite (ou n'utilise) que 18 tonalités sur les 24 possibles, et que parmi celles-ci, certaines sont peu exploitables ; on notera aussi le caractère fortement marqué des tons comportant plus de trois altérations.

Les connotations perçues par les musiciens habitués à ces tempéraments nous surprennent souvent par leur vigueur. Rameau, par exemple, soutient que :

> "nous recevons des impressions differentes des intervales à proportion de leur differente alteration : Par exemple, la Tierce majeure qui nous excite naturellement à la joye, selon ce que nous en éprouvons, nous exprime jusqu'à des idées de fureur, lors qu'elle est trop forte ; la Tierce mineure qui nous porte à la douceur & la tendresse, nous attriste lors qu'elle est trop foible"[1]

5.2. Ethos des tonalités et tempérament égal

Il faut tout d'abord bien comprendre que le caractère des tonalités est absolument indépendant de la hauteur absolue (qui n'était d'ailleurs pas fixée à cette époque, cf. chap. XVI). C'est le rapport entre les intervalles et leurs différentes proportions qui crée la variété des impressions. En tout

---

[1] J.-P. Rameau, *Nouveau Système de Musique Théorique.*

état de cause, l'ethos est par définition impossible avec le tempérament égal, où quel que soit le ton, la succession des valeurs reste identique.

A quoi attribuer alors la permanence de telles nomenclatures dans des traités théoriques du XIX^ème^ et même du XX^ème^ siècle ? A *"l'habitude invétérée des théoriciens de se copier les uns sur les autres sans réfléchir à ce qu'ils écrivent "* ? (J.Chailley) Pour une part, sans doute, car il est difficile d'expliquer autrement des assertions comme celles de Louis Lacombe qui préconise ut mineur pour les expressions pathétiques, ré majeur pour les chants éclatants, fa mineur dans les expressions lugubres et sombres, etc[1]. Ou celle d'Albert Lavignac qui établit lui aussi sa propre liste[2] : ut majeur simple, naïf, franc ou plat et commun ; ré majeur gai, brillant, alerte ; mib majeur sonore, énergique, chevaleresque, etc. A noter qu'une telle description figurait dans la 1^ère^ édition (1863) du *Traité général d'instrumentation* de François Gevaert et fut supprimée des éditions suivantes.

En dehors des généralisations abusives, il existe certainement des causes obscures et mal connues qui conditionnent notre attitude vis-à-vis des rapports tonals. Le problème se pose évidemment moins avec l'extension de l'atonalité, mais qu'est-ce qui conduit un compositeur à choisir tel ton plutôt qu'un autre ? En théorie ils sont tous équivalents et cependant nous sentons bien que ce n'est pas toujours le cas. Il existe en effet au moins quatre raisons objectives qui pourraient expliquer ce phénomène.

Tout d'abord, certains instruments de musique ne sonnent pas de la même manière dans toutes les tonalités : cela dépend de leur facture ou de leur accord. Un violoniste, par exemple, (accordé sur sol ré la mi) peut jouer toutes ses cordes à vide dans le ton de ré (majeur ou mineur) et

---

1 L. Lacombe, *Philosophie et Musique*, Paris, 1896.
2 A. Lavignac, *La Musique et les Musiciens*, Paris, 1895.

beaucoup de concertos sont pour cette raison écrits dans cette tonalité (par exemple Vivaldi, Bach, Paganini, Beethoven, Brahms, Bruch, Tchaïkovski pour s'en tenir aux plus célèbres). A l'opposé, en fa# majeur ou en réb majeur, il n'en dispose plus d'une seule, et le timbre de l'instrument s'en trouvera modifié, perdra en clarté. Le problème est similaire avec les cuivres qui utilisent les partiels naturels du tuyau : certains tons leur conviennent mieux que d'autres, et ils ne sonnent pas tous de façon identique.

L'exemple du violon permet de bien saisir la différence entre l'échelle des tons et la hauteur absolue : si un violon était accordé un demi-ton plus haut et joué avec les doigtés habituels, une pièce en ré sonnerait objectivement en mib mais conserverait pour la grande majorité des auditeurs (qui n'ont pas l'oreille absolue) son caractère de ré puisque rien ne changerait pour l'exécutant, le nombre de cordes à vide, etc.

D'une façon générale, l'expérience a souvent été faite de transposer les oeuvres sans en prévenir les auditeurs, et il est prouvé qu'elles conservent leur caractère d'origine : la *V^ème^ Symphonie* de Beethoven ne devient pas solitaire et mélancolique exécutée un demi-ton plus bas...

La deuxième raison tient au rapport même des tonalités entre elles. Selon Vincent d'indy, les modulations paraissent monter vers la clarté dans le sens des quintes aigus (les dominantes), c'est-à-dire par les dièses ; en revanche, elles s'obscurcissent dans le sens des quintes graves (les sous-dominantes), par les bémols. Cette hypothèse[1] semble confirmée tant les exemples sont nombreux.

Beaucoup de musiciens, d'autre part, — et cela tient à l'éducation — entendent instinctivement par rapport à do, qui fait office de pivot, de

[1] V. d'Indy, *Cours de composition musicale*, 3 vol., Paris, 1900, 1909, 1933.

centre à partir duquel partent d'un coté les dièses, de l'autre les bémols ; de sorte qu'une tonalité prise isolément l'est en fait par rapport à do, et dire qu'en mi majeur il y a quatre dièses à la clé, c'est comparer à do majeur, qui en possède effectivement quatre de moins. Si la référence était ré, le ton de mi n'en aurait que deux.

Troisième argument, qui intéresse les musiciens entraînés : le caractère des tonalités semble lié à la lecture plus qu'à l'audition. Des expériences réalisées autrefois à l'Institut de Musicologie par Jacques Chailley ont montré que l'analyse esthétique était en partie conditionnée par l'écriture : des groupes d'étudiants analysant la même partition, mais l'une écrite en fa# et l'autre en solb, sont parvenus à des conclusions opposées.

Enfin, la mémoire d'oeuvres célèbres, comme les symphonies de Beethoven, par exemple, dont les tonalités sont souvent citées, influence l'impression tonale préalable : ut mineur tragique, mib majeur héroïque sont des associations qui ont pénétré inconsciemment les esprits, et en premier lieu ceux des compositeurs du XIX^{ème} siècle, influencés eux-mêmes par les oeuvres qu'ils admiraient.

Si donc il existe un ethos pour le tempérament égal, il est de nature radicalement différente de celui des autres tempéraments, et relève en grande partie de la psychoacoustique et de la sociologie musicale.

CHAPITRE XVI

LE DIAPASON

1. La mesure du diapason

Fixer le diapason, au sens moderne du terme, consiste à affecter à une note de musique, généralement le *la* par convention, une fréquence précise, devant servir de référence, notamment pour l'accord des instruments de musique.

Il existe une difficulté principale à la mesure ou à l'établissement du diapason : la fréquence fournie par un tuyau varie avec la célérité du son, et celle-ci avec la température de l'air. Cela signifie que dans tous les instruments à vent, y compris l'orgue, le son monte quand la température augmente.

Voici quelques valeurs théoriques pour le la_3 à différentes températures :

35°	450 Hz
30°	446 Hz
25°	443 Hz
20°	440 Hz
15°	436 Hz
10°	432 Hz

La variation est effectivement très sensible, elle représente par exemple près de 70 cents (plus d'un quart de ton) entre 10° et 35°.

D'importants écarts de température peuvent se produire entre le début et la fin d'un concert : n'oublions pas que c'est de l'air à près de 37° qu'insufflent les musiciens dans leurs instruments ; l'orgue aussi peut subir de grandes fluctuations de température, entre l'hiver et l'été.

Comme c'est le hautbois — un instrument à vent — qui donne généralement le *la* dans un orchestre, la précision s'avère problématique. Évidemment, la plupart des musiciens, surtout dans les ensembles, rectifient à l'oreille et rétablissent empiriquement, dans la mesure où l'instrument le permet, la hauteur supposée correcte du diapason. C'est toutefois difficile — voire impossible — pour les instruments à trous latéraux, comme les bois, plus aisé pour les tuyaux à anches membraneuses, comme les cuivres. L'audition s'accomode le plus souvent de ces fluctuations qui font somme toute partie de l'exécution musicale (cf. chap. XIV). Cependant certains professionnels (surtout les chanteurs d'opéra) se plaignent du diapason qu'ils accusent de monter continuellement. (Nous verrons plus loin quelle lumière peut jeter sur cette question une étude historique).

Il n'est donc pas aisé d'effectuer des mesures précises du diapason d'un orgue ou d'un orchestre, et les résultats obtenus dans un lieu précis à un moment donné doivent obligatoirement intégrer la température sous peine d'être inexploitables. Or, chacun le remarquera, ces indications accompagnent hélas rarement les valeurs citées dans la presse quand elle se fait l'écho de « l'irrésistible ascension du diapason ».

2. Éléments d'histoire du diapason

2.1. Période ancienne

Le concept de hauteur absolue a probablement vu le jour en Chine : un document daté du IIIème siècle av. J.-C. l'attribue au règne de l'empereur mythique Huang Ti (IIIème mill. av. J.-C.) : la référence était alors fournie par des tubes de bambou calibrés, coupés entre deux noeuds et dans lesquels on soufflait ; plus tard, vers le VIème siècle av. J.-C., les tuyaux furent remplacés par des cloches de bronze. Quand une dynastie s'écroulait, c'est qu'elle n'était plus en harmonie avec l'Univers, les cloches étaient alors refondues et le diapason changé.

Les conceptions chinoises n'eurent apparemment aucune influence sur l'Occident. La théorie musicale grecque ne semble pas avoir connu de diapason fixe, pas plus que celle du Moyen Age qui s'en inspire étroitement. D'ailleurs il n'existe aucun mot grec ou latin pour désigner cette notion. Le terme diapason (du grec διαπασον), si fréquent dans les textes, signifie *octave*.

Des traités médiévaux[1], il ressort qu'une corde quelconque était tendue sur un monocorde et servait à établir des proportions auxquelles on donnait des noms de notes, de hauteur absolue par conséquent variable. Même absence de précision avec les tuyaux d'orgues :

> "*Gravis C, quæ est prima fistula, longitudo ponitur ad placitum*"[2] [le do grave, qui est le premier tuyau, aura une longueur quelconque] ;
>
> "*Primum fistulam tantæ longitudinis ac latitudinis delibera, quantum mediocritas cum arbitrio doceat* "[3]

---

1 Cf. par ex. W. Odington, *De speculatione musicæ* ; pseudo S. Tunstede, *Quatuor principalia musicæ* ; Jacques de Liège, *Speculum Musicæ*.
2 pseudo Odon de Cluny, *Intronarium*, Xème siècle.
3 Aribo, *De Musica*, XIème siècle.

> [choisissez pour le premier tuyau la longueur et le diamètre que vous voudrez, c'est votre sens de la mesure (*mediocritas*) autant que votre bon plaisir qui vous guidera].

La situation est encore la même jusqu'au XVI^ème^ siècle. Ainsi Philibert Jambe de Fer propose-t-il pour accorder le violon de tendre la corde la plus grave (sol) "*aussi fort qu'il se pourra*" et d'accorder ensuite les autres cordes en quintes justes[1]. Il est clair que cette méthode implique l'absence de diapason.

Mais, dès la fin du XVI^ème^ siècle, avec la constitution d'ensembles instrumentaux par familles et les premiers orchestres, peut-être également avec la diffusion croissante de la musique imprimée, se créent progressivement des usages locaux, certes encore largement variables d'une ville à l'autre. Avant cette époque, grande était la difficulté de jouer ensemble, et les instruments se regroupaient plus par possibilités d'accord que par affinités naturelles ; c'est ce qui explique le caractère parfois hétéroclite des formations dont témoigne l'iconographie.

La référence est donnée par l'orgue. Il est normal, puisqu'on ne sait pas encore mesurer la fréquence, d'utiliser comme étalon un tuyau de longueur connue : l'*ut* correspondait alors à l'unité métrique, le *pied*. Mais cette unité n'est pas la même partout. En voici quelques valeurs par ordre croissant de longueur :

SAXE	:	28,32 cm
HOLLANDE	:	28,40
WÜRTEMBERG	:	28,65
BAVIÈRE	:	29,19
BADE	:	30,00

---

1 Ph. Jambe de Fer, *Épitome musical des tons, sons et accords (...)* , Lyon, 1556.

ANGLETERRE	:	30,48
PRUSSE	:	31,39
AUTRICHE	:	31,61
FRANCE	:	32,48
ITALIE	:	35,57

Il est possible, grâce à ces indications, de reconstituer l'écart entre les différents diapasons. Par exemple :

SAXE-BAVIÈRE	= 52 cents
SAXE-ANGLETERRE	= 127 cents
SAXE-FRANCE	= 237 cents
SAXE-ITALIE	= 395 cents

Le diapason bavarois était plus bas d'un quart de ton que le saxon, l'italien d'une tierce majeure, ce qui est d'ailleurs conforme aux observations de Prætorius.

Afin de rendre ces chiffres plus parlants, fixons arbitrairement le pied anglais (dont la taille est moyenne par rapport aux autres) à 440 Hz : dans ce cas, le diapason en Saxe se serait trouvé à 473 Hz (entre si et sib), en France à 413 Hz (soit sol#) et en Italie à 377 Hz (env. fa#). L'écart entre ces valeurs extrêmes est à peu près celui que l'on retrouve en examinant les instruments à vent conservés dans les divers musées d'Europe.

2.2. Période moderne

A partir du XVIII^{ème} siècle, les informations sont plus nombreuses, mais concordent néanmoins sur un point : la hauteur du diapason est encore largement dispersée.

L'invention de l'instrument diapason permet des appréciations plus précises. Appelé *choriste* à l'origine — trahissant ainsi sa destination —,

il s'agit d'un chalumeau à hauteur fixe, ou d'un corps de flûte muni d'un piston coulissant, ce qui confirme la pluralité des références. L'invention du diapason à fourche, attribuée à l'Anglais John Shore en 1711 par la plupart des dictionnaires, est sans doute plus tardive et ne date probablement que du début du XIX^{ème} siècle.

Dès 1700, l'acousticien Joseph Sauveur parvient à mesurer la fréquence d'un son par la méthode des battements : il trouve 405 Hz pour le la du Grand Opéra de Paris, soit 3/4 de ton de moins que notre la_3 actuel. Mais les relevés sont encore imprécis, sporadiques, et ne tiennent pas compte de la température.

Ce qui est en revanche certain, c'est la coexistence dans une même ville de plusieurs références selon la destination. En France, les textes mentionnent souvent le *ton du Choeur*, le *ton de la Chapelle* et le *ton de l'Opéra*. Certains choristes à piston, bien conservés, comportent effectivement sur leur corps trois repères gravés correspondant à ces trois diapasons. Le ton du Choeur est généralement le plus bas, et celui de l'Opéra le plus haut (ce qui est logique, puisque destiné à des chanteurs professionnels). Cet usage est ancien, et en 1541 déjà, le facteur Jean Bondifer proposait

> d'"antoner lesdites orgues [de la Collégiale Sainte-Maxe] en bas tons selon qu'il sera de besoing en sorte que les chantres puissent aisément chanter et convenir avec lesdites orgues."

Cet usage est cependant loin de prévaloir partout et tout le temps, et il existe des cas contraires (cf. Dictionnaire de Musique, art. "ton", où Rousseau constate :

> "Peut-être, depuis qu'il existe de la musique, n'a-t-on jamais concerté deux fois sur le même ton".

En Allemagne, il n'est pas rare que les orgues soient accordées plus hautes que les orchestres. J.-S. Bach jouait sur de tels instruments, réglés presque un ton plus haut que le la actuel. Le matériel autographe de certaines cantates (BWV 152, 161, 162, 182, 185, notamment) le prouve, où orgue et orchestre ne sont pas écrits dans la même tonalité.

Il est donc inexact d'affirmer que le diapason ancien était systématiquement plus bas que le nôtre. D'abord inexistant, il s'est progressivement constitué en une large fourchette dont les limites sont approximativement le fa et le si actuels. Ce n'est qu'au XIX^{ème} siècle qu'apparurent les véritables tentatives de standardisation.

3. La codification du diapason

C'est une démarche totalement nouvelle. Au lieu de se borner à constater les usages établis et s'aligner dessus, une norme va être définie, qui sera entérinée par les Pouvoirs publics et imposée aux praticiens.

Que s'est-il passé ? Pourquoi un tel changement d'état d'esprit ? Certains musiciens ou organismes commencent à se plaindre de la montée du diapason. Bernard Sarrette, fondateur du Conservatoire de Paris et directeur de 1796 à 1814, s'inquiète du ton utilisé pour les concerts des élèves ; après un relevé de différents diapasons parisiens, il décidera d'un *"terme moyen"* qui entrera dorénavant en vigueur dans son établissement[1].

Compte tenu de l'imprécision des relevés (cf. supra), il est difficile de juger du bien-fondé de ces plaintes. Il semble toutefois qu'entre 1700 et 1850, le diapason ait monté à Paris de 405 à 450 Hz, c'est-à-dire environ d'un ton. Mais encore une fois, ces chiffres ne sont qu'indicatifs et ne

---

1 Note du 11 décembre 1812.

concernent pas toujours les mêmes salles de concert ni les mêmes orchestres.

L'idée d'une codification gagne cependant du terrain, et une première Commission internationale voit le jour en 1834 à Stuttgart : le physicien Scheibler y préconise l'adoption du la_3 à 440 Hz. Cette recommandation ne fut suivie d'aucun effet, et resta lettre morte auprès des musiciens.

3.1. La commission Lissajous

La réunion de Stuttgart avait été insuffisamment préparée. L'idée est reprise en France, mais avec une meilleure organisation. Une Commission impériale est créée à cet effet, par arrêté ministériel du 17 juillet 1858. Elle se compose de treize membres : quatre administrateurs, sept musiciens (Auber, Berlioz, Halévy, Meyerbeer, Rossini, Thomas, et le général Mellinet pour les musiques militaires) et deux physiciens, dont Lissajous.

La Commission fit une enquête dans toute l'Europe, en demandant aux grandes villes d'envoyer un diapason à fourche correspondant à l'usage en vigueur. Cette collection se trouve actuellement rassemblée au Musée du Conservatoire National de Musique de Paris. L'étude de ces précieux instruments est révélatrice, et donne pour la première fois une idée précise de la hauteur du la dans les principaux centres européens.
En voici un aperçu, du plus grave au plus aigu, d'après les relevés de Lissajous (confirmés par des mesures plus récentes) :

LONDRES 1	434 Hz
CARLSRUHE	435
TOULOUSE (Conservatoire)	437
DRESDE	441

TOULOUSE (Grand Théâtre)	442,5
BORDEAUX	443
STUTTGART	443
BRUNSWICK	443,5
WEIMAR	444,7
TURIN	444,7
LA HAYE	446,1
MARSEILLE	447
PARIS (Grand Opéra)	448
MUNICH	448,1
PRAGUE	449,7
SAINT-PETERSBOURG	451,5
BERLIN	451,7
LILLE	452
LONDRES 2	452,5
LONDRES 3	455,2
BRUXELLES (Musique de Guides)	455,5

La Commission rend son rapport, rédigé par Halévy. Dans la première partie, celui-ci constate la montée du diapason depuis plusieurs années, et en recherche les raisons qu'il attribue à une cause psycho-physiologique (il le dit en d'autres termes) : les sons légèrement haussés paraissent plus brillants, et il en rejette la responsabilité sur les facteurs d'instruments à vent.

La deuxième partie est consacrée à l'analyse et au relevé des fréquences des diapasons reçus :

1ère constatation : l'écart le plus grand — observé entre Londres 1 et Bruxelles — représente moins d'un demi-ton tempéré (84 cents) ;

2ème constatation : "la France compte à ses deux extrémités un des diapasons les plus élevés, celui de Lille, un des diapasons les plus graves, celui de l'École de Toulouse".

Le rapporteur présente ses conclusions dans la troisième partie : il faut abaisser le diapason, et lui donner une valeur moyenne par rapport aux usages en vigueur. Mais contrairement à cette profession de foi tout à fait raisonnable, la Commission préconise le la_3 à 435 Hz pour une température de 18°C, s'alignant en fait sur le diapason le plus bas d'Europe (Londres 1 excepté). Cette prise de position s'explique mal encore aujourd'hui : n'aurait-il pas été plus logique de prendre comme étalon la véritable moyenne d'alors, soit 444 Hz ? En outre, une baisse aussi drastique avait-elle des chances de succès à long terme ?

Quoi qu'il en soit, cette valeur devint légale en France, par un arrêté ministériel daté du 16 février 1859, et un diapason-étalon fut déposé au Conservatoire National des Arts et Métiers.

3.2. La Conférence internationale de Vienne

La décision de Paris fut saluée à l'époque par l'ensemble des capitales européennes et les autorités politiques et scientifiques françaises félicitées pour cette initiative sans précédent.

Afin qu'une telle démarche puisse s'étendre, une nouvelle réunion — cette fois à caractère international — se tint à Vienne en 1885. Les conclusions de Paris furent adoptées sans modifications, et le la_3 à 435 Hz s'imposa à l'Europe musicale, officialisé par voie législative.

Cette nouvelle norme se généralisa dans un premier temps, plus ou moins vite selon les pays ; l'Angleterre, qui usait le plus souvent de diapasons très élevés, se montra la plus réticente.

3.3. Le diapason actuel

La baisse avait été trop brutale en 1859 et en 1885. Depuis, le diapason n'a cessé de remonter, plus difficilement il est vrai, moins rapidement, puisque sa fréquence est en principe garantie par la loi. En 1938, il se situait à 440 Hz pour les orchestres parisiens et la radio allemande *Deutschlandsender*, à 442 pour les pianos de la Radiodiffusion française ; d'autres mesures font état de chiffres très élevés mais ne tiennent pas toujours compte de la température : 445 aux États-Unis, 450 en Angleterre, 461 en Autriche et jusqu'à 467 à Prague, soit sib[1].

Certaines réactions sont spectaculaires : Adolf Hitler interdit en octobre 1938 tout diapason autre que 435 sur le territoire du Reich.

Une nouvelle réunion est jugée nécessaire, elle se tient à Londres en 1939, au siège de l'ISO[2] et ne comprend que des ingénieurs et des techniciens (Pierre Schaeffer représente la France). S'appuyant sur des mesures effectuées d'après des émissions de radio, la commission propose la normalisation du la à 440 Hz, exactement comme à Stuttgart en 1834... Puis survient la guerre, et cette recommandation est oubliée.

Dès la fin des hostilités, le problème se pose à nouveau, et l'idée est lancée en 1952 d'une vaste consultation à l'échelle européenne, un véritable référendum, mais s'adressant uniquement aux spécialistes. L'année suivante, en 1953, le Comité d'acoustique de l'*Organisation Internationale de Normalisation* tient son congrès à Londres une nouvelle fois, et, reprenant les conclusions de 1939, décide de fixer le diapason à 440 Hz pour une température de 20°C. En France, le Président du Conseil entérine cette décision par un décret signé quelques semaines plus tard, et c'est encore à ce jour la valeur légale du la_3.

---

1 Annales de l'IRCAT (Institut de Recherche et Coordination Acoustique et Technique), n° 1, 1939.

2 *Institut for Standardization Organisation.*

Quelques remarques s'imposent au terme de cette étude. D'abord concernant l'ascension continuelle du diapason. A l'heure actuelle, toutes les mesures le prouvent, le diapason a remonté, et se stabilise environ à 444 Hz : c'est exactement la moyenne à laquelle il se trouvait... en 1858.

Quant aux fluctuations de hauteur, elles sont bien inférieures à celles que l'on enregistrait aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècle : la moyenne statistique (qui concerne le monde occidental tout entier) est à peine supérieure de 16 cents à la norme légale.

Enfin, il ne faut jamais oublier que le concept de normalisation est récent — moins de deux siècles — et se référer au diapason d'une oeuvre ancienne est une entreprise délicate, supposant des recherches sur les usages locaux à une époque précise ; cela n'a de toute façon guère de signification avant le XVII^{ème} siècle. La pratique d'un « diapason baroque » fixe et plus bas que le nôtre (souvent 415 Hz) est à cet égard un double contre-sens : par anachronisme et par méconnaissance de la largeur de la fourchette autrefois utilisée. Cela ne veut pas dire qu'il faille jouer les œuvres anciennes au diapason actuel, mais que la réalité historique est d'une complexité qui la rend rebelle aux systèmes un peu trop simples.

CHAPITRE XVII

LA SENSATION DE TIMBRE

Des quatre paramètres qualifiant un son, la hauteur, l'intensité, la durée et le timbre, le dernier est celui qui se laisse le moins aisément cerner (cf. les définitions embarrassées des dictionnaires usuels). Il n'existe d'ailleurs pas, comme pour les trois autres, d'unités acoustiques susceptibles de le mesurer, et à dire vrai la notion même de timbre est étrangère à la physique, pour laquelle la fréquence et l'intensité des composants présents suffisent à caractériser complètement un spectre sonore. Ce point de vue, sans doute tout à fait valable sur le plan théorique, ne correspond pourtant pas à la réalité perceptive. Bien au contraire, le vocabulaire des musiciens est d'une grande richesse dans ce domaine, et reflète une sensibilité auditive aiguë à cette dimension du son.

C'est pour cette raison que l'étude du timbre reste largement empirique et orientée vers la psychophysiologie auditive, puisque c'est bien d'une sensation qu'il s'agit. Elle est principalement fonction de trois éléments : la composition du spectre sonore, le « corps du son » en quelque sorte ; les phases d'établissement et d'extinction du son, c'est-à-dire la partie la plus dynamique et instable du spectre ; enfin,

l'environnement, les conditions d'écoute, et d'une façon générale les canaux de diffusion qui participent eux aussi à l'élaboration de la sensation de timbre.

1. La composition spectrale

En première analyse, le timbre est fonction de la composition spectrale ; c'est même souvent — bien à tort — le seul facteur retenu pour expliquer sa formation. La sensation de timbre varie avec le type de spectre, harmonique, à partiels ou aléatoire.

1.1. Spectres harmoniques

Les vocables qualifiant le timbre, nous l'avons dit, sont nombreux et imagés. Il est possible d'observer, avec le sonagraphe, la structure interne d'un son, et d'établir ainsi une correspondance entre qualificatif et composition spectrale (fig. 67). Les quatre premiers sons n'ont qu'un seul composant et sont donc sinusoïdaux. Dans ce cas extrême, le timbre varie avec l'intensité et la fréquence ; il évoque également des phonèmes : *m* ou *n* en-dessous de 130 Hz, successivement *ou, o, a, é, i* entre do_3 et do_7 environ (262-4186 Hz) et *f* puis *s* au-dessus de 8000 Hz.

Les sons e et g sont pauvres en harmoniques mais leur énergie est surtout située dans le grave et décroît régulièrement avec le rang des composants : e évoque certains bourdons d'orgue, tandis que g est typique de la flûte traversière (dans le registre grave). Le son f ne présente aucun formant et perd ainsi toute connotation de « douceur ».

Les exemples h et i sont tous deux riches en harmoniques mais perçus différemment du fait de la répartition de l'énergie : un spectre homogène et régulier, sans formant, paraît souvent « maigre » aux oreilles occidentales. Un tel timbre est produit par des instruments dont

la corde vibrante est longue par rapport à la caisse de résonance, comme les vièles extrême-orientales (*hou-k'in* chinois, *dàn nhi* vietnamien). Le son i n'est autre qu'un spectre en dents de scie produit par des oscillations de relaxation.

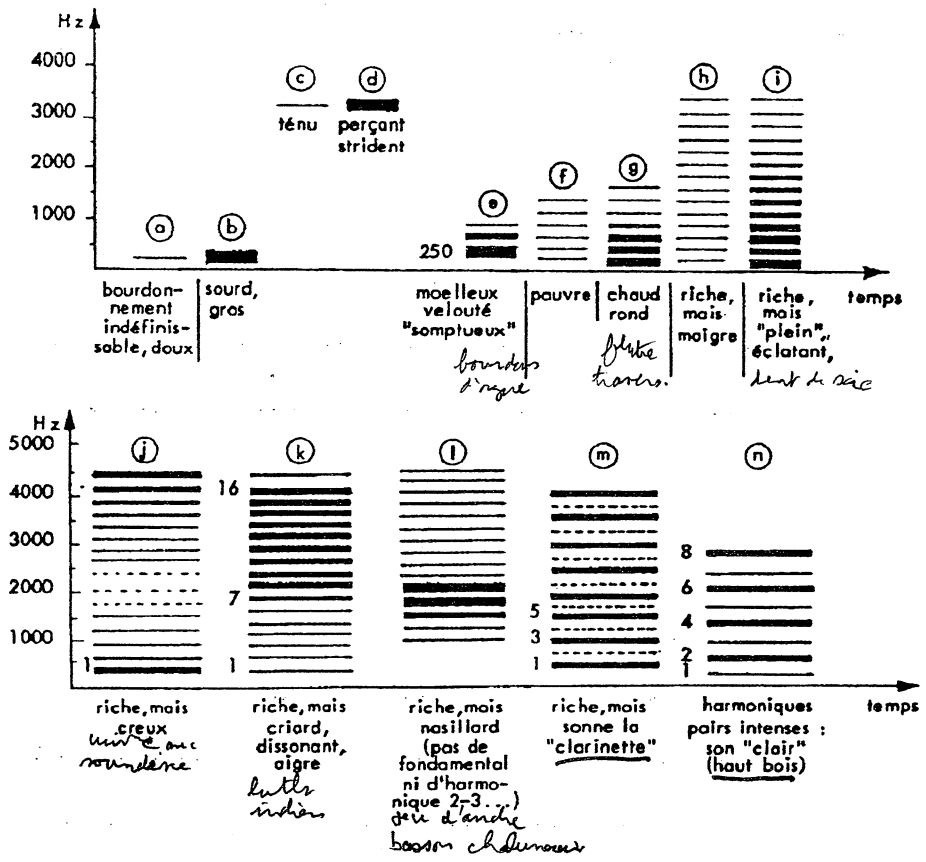


Fig. 67 : timbre et composition spectrale

Le son j présente une bande de réjection entre 1500 et 2500 Hz ; ces « trous » sont provoqués par les sourdines des cuivres (trompette bouchée). Un formant placé très haut avec peu d'énergie dans le grave (son k) renforce les dissonances des harmoniques élevés par rapport au fondamental : de tels effets sont volontairement créés avec certains luths indiens (*tanpura* ou *rudravina*). Un formant situé plus bas, dans une zone plus consonante, crée un nasillement caractéristique de certains

jeux d'anches à l'orgue, du registre grave de la clarinette (chalumeau) ou encore du basson surtout si les premiers harmoniques sont faibles.

Les deux derniers exemples présentent des configurations plus ou moins régulières : le son m, riche en harmoniques de rangs impairs (médium de la clarinette), est le produit d'oscillations carrées, et la clarté du spectre du hautbois (ex. n) provient d'une nette prédominance d'harmoniques de rangs pairs engendrés par des oscillations triangulaires.

Ces sonagrammes sont schématiques et la réalité est évidemment beaucoup plus diverse et complexe. Un même type d'instrument ne présente pas un timbre complètement homogène sur toute son étendue, et l'instrumentiste joue un rôle déterminant dans le résultat final.

Il ressort néanmoins de ces exemples que le timbre des spectres harmoniques est fonction de quatre variables principales :

1. le nombre de composants
2. leur répartition dans le spectre
3. l'intensité relative des harmoniques entre eux
4. leur degré de consonance avec le fondamental

Ces variables servent de base à l'analyse spectrale : déterminer la plus ou moins grande **richesse** du son, détecter la présence éventuelle de **bandes de réjection**, mettre en évidence les **formants** et leur importance, évaluer leur **emplacement** dans le spectre et leur éloignement du fondamental.

1.2. Spectres à partiels

La perception du timbre n'est pas très différente avec les spectres à partiels. Leur **degré d'inharmonicité**, qui joue un rôle déterminant dans

la sensation de hauteur, peut intervenir ici comme une cinquième variable venant s'ajouter aux quatre précédentes.

Les spectres à inharmonicité faible ou systématique, c'est-à-dire dans lesquels l'écart entre deux partiels consécutifs augmente régulièrement (cf. fig. 43 c p. 104), peuvent être assimilés au régime harmonique. Pour ceux dont l'inharmonicité est forte, le timbre est largement influencé par l'intensité des formants et les rapports d'intervalles entre les partiels dominants (points 3 et 4).

1.3. Spectres aléatoires

Il s'agit des diverses formes de bruits, qui contiennent un grand nombre de composants répartis et évoluant aléatoirement au sein du spectre (cf. fig. 44 p. 106). Comme il n'existe aucune relation perceptible entre les éléments constitutifs de l'ensemble, l'oreille ne distingue plus de hauteur précise, mais une sensation de registre.

Cela implique des conséquences sur le timbre, qui ne peut dès lors être appréhendé comme un spectre de raies. C'est pourquoi d'autres critères d'analyse doivent être retenus :

1. largeur du spectre
2. durée
3. coloration
4. densité

La **largeur** (ou largeur de bande) d'un spectre aléatoire est son étendue en fréquence, du grave à l'aigu. L'interférence entre hauteur et timbre est ici particulièrement évidente : augmenter la hauteur d'un *chhh* le transforme en *ssss* .

La **durée** modifie elle aussi radicalement la sensation de timbre. La perception d'un bruit blanc, qui contient aléatoirement toutes les

fréquences, est différente selon que le spectre est très bref ou plus long : l'allongement temporel des chocs, claquements et explosions les transforme en bruit d'écoulement d'air comprimé.

La **coloration** et la **densité** sont fonction de l'énergie acoustique et de sa répartition dans le spectre. La coloration agit donc comme un formant modifiant le timbre en fonction de son (ou ses) emplacements : la densité permet d'apprécier ou de mesurer son amplitude.

Les termes — presque péjoratifs — utilisés pour qualifier de tels sons, bruits ou spectres aléatoires, ne doivent pas faire oublier qu'il s'agit d'éléments fondamentaux pour la perception musicale, parce que constituant l'essentiel des phénomènes transitoires.

2. Les transitoires

On appelle transitoires les phases d'établissement (attaque) et d'extinction du son, c'est-à-dire précédant et suivant le corps du son, qui en est la partie la plus stable (mais néanmoins sujette elle aussi à d'importantes fluctuations).

L'acoustique classique a souvent négligé les aspects les plus évolutifs du son dans sa recherche de la genèse du timbre. Cela s'explique certainement par la grande complexité de phénomènes qui durent parfois moins d'une milliseconde, et sont donc très difficiles à isoler et à mesurer.

Nous savons aujourd'hui que l'action des transitoires est déterminante dans la perception du timbre, comme l'a démontré la psychoacoustique expérimentale. Par exemple, un son de harpe ou de guitare enregistré sur bande magnétique et lu à l'envers est rendu méconnaissable. Il conserve pourtant son intégrité sur le plan spectral (nombre de composants, situation et importance des formants, etc.), mais subit une transformation sur le plan dynamique : attaque douce et

progressive, fin brusque et sèche, du fait de l'inversion des transitoires d'attaque et d'extinction.

De même, si des accords de piano sont amputés, sur un enregistrement, des quelques millisecondes que dure leur attaque et si l'extinction est « corrigée » artificiellement par un relèvement progressif du niveau au potentiomètre d'entrée, de façon à obtenir une intensité à peu près constante pendant la durée du son, rien n'est modifié, là non plus, pour la composition spectrale, et seuls les transitoires sont manipulés : cela suffit à changer radicalement le timbre du piano, au point de le faire ressembler à de l'harmonium, ou même à du violoncelle...

Une dernière expérience, riche d'enseignement, tout comme les précédentes facile à réaliser avec un magnétophone : remplacer, au début d'une note de violon durant environ une seconde, le coup d'archet par une attaque de flûte traversière. A l'audition d'un tel « monstre », l'oreille est désemparée (on la comprend), mais identifie presque toujours un instrument à vent (curieusement à anche), en tout cas pratiquement jamais un instrument à archet. Cela signifie que notre système auditif, ayant le choix entre les quelques millisecondes du transitoire de la flûte et la seconde entière du son de violon, penche immanquablement vers la famille des vents, c'est-à-dire privilégie le mode d'attaque plutôt que le corps sonore.

Sur le plan perceptif, notre cerveau traite les données en temps réel, et tout se passe comme si les sons étaient triés à l'entrée de la mémoire immédiate par leur début : dans ce cas, le dernier exemple serait mal classé par rapport au timbre du violon, et une fois rangé au milieu des sons d'instruments à vent, ne serait plus identifiable.

2.1. Les transitoires d'attaque

Attaquer un son consiste à communiquer en un temps très bref un certaine quantité d'énergie potentielle à un corps sonore : celui-ci est alors le siège d'un grand nombre de phénomènes vibratoires complexes, concrètement des partiels à la durée de vie très courte, jusqu'à ce que le corps trouve son régime propre, et dissipe dans le temps l'énergie potentielle reçue dans le cas de vibrations libres, ou au contraire se soumette à l'excitateur en s'accordant sur lui dans le cas de vibrations forcées.

Les transitoires d'attaque présentent des formes spectrographiques variées, caractérisées par une proportion plus ou moins importante de bruit qui trahit le mode d'excitation de l'instrument (fig. 68) :

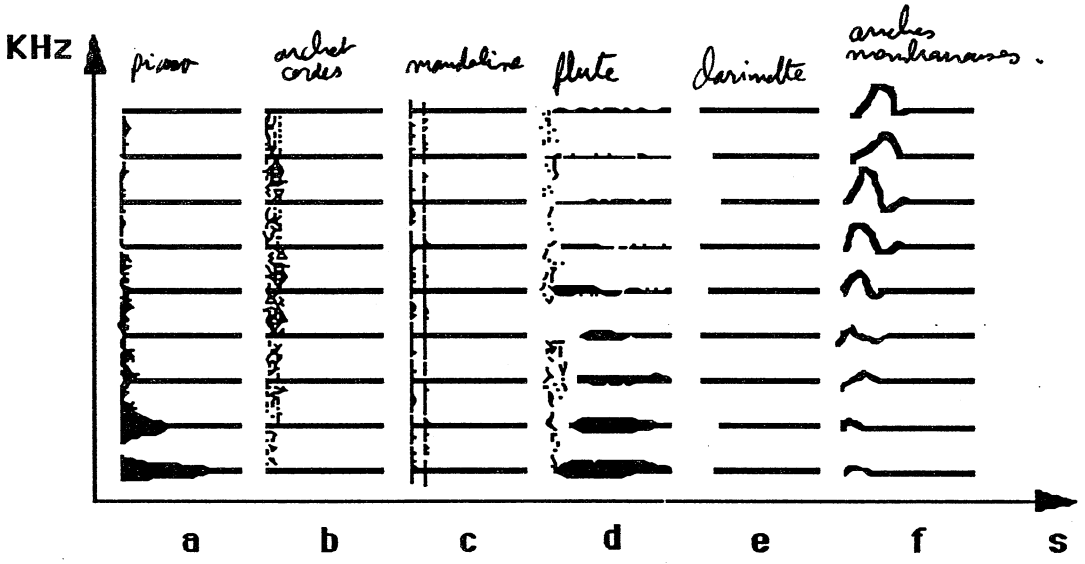


Fig. 68 : transitoires d'attaque : proportion de bruit

Le transitoire peut être un choc très bref, comme dans le piano (a) ou les percussions. Le frottement des archets sur les cordes provoque un bruit blanc (violon, b). Deux légers chocs très rapprochés indiquent un coup de plectre sur des doubles cordes (mandoline, c). Le bruit de souffle,

typique des instruments à biseau, se traduit par un spectre aléatoire de faible densité et inégalement distribué (flûte, d) ; on remarque également l'intensité croissante de certains harmoniques, qui donne une forme dite « en fuseau ». Le transitoire peut être purement temporel (cf. infra) et ne comporter aucun bruit d'attaque, comme avec les anches battantes (clarinette, e). Avec les instruments à anches membraneuses (trompe de chasse, f), il prend la forme d'une déviation rapide des raies harmoniques, qui produit une fluctuation de hauteur à la limite de l'audibilité mais tout à fait caractéristique.

Les transitoires d'attaque ne se réduisent pas uniquement à une proportion plus ou moins importante de bruit, et leur dimension temporelle doit également être analysée. Elle se traduit d'abord par une durée totale, comprise entre l'apparition du premier composent et celle du dernier. A l'intérieur de cette durée, qui varie dans des proportions importantes, l'ordre d'apparition des composants est significatif et doit être pris en compte.

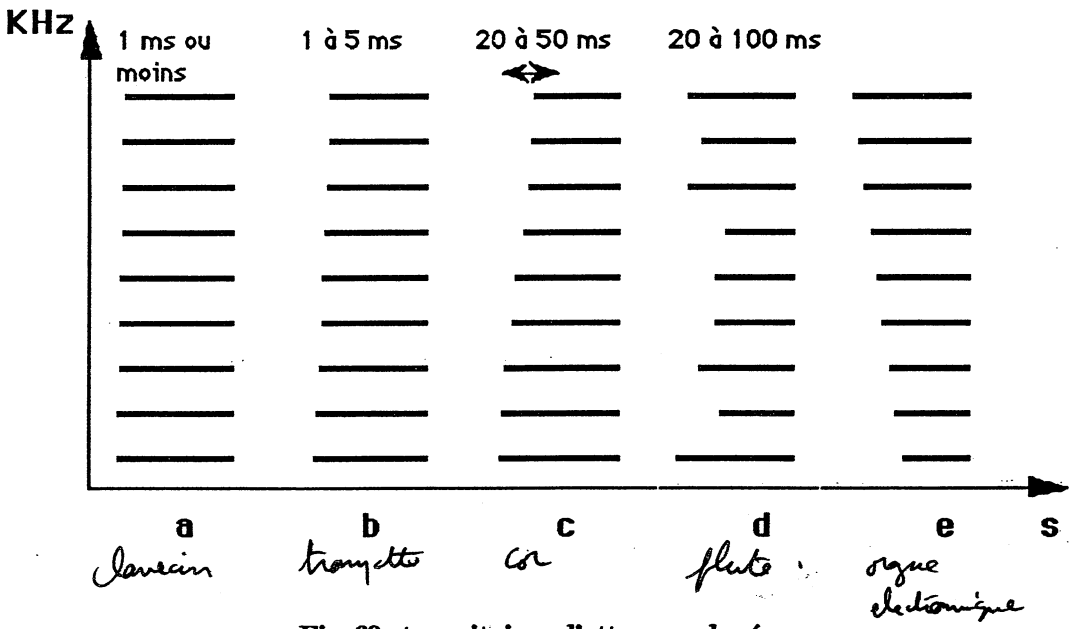


Fig. 69 : transitoires d'attaque : durée

La figure 69 schématise quelques allures temporelles typiques. Avec les percussions, les cordes frappées ou pincées, tous les composants arrivent en même temps (ou presque) et la durée du transitoire est parfois inférieure à 1 milliseconde (clavecin, a). Les harmoniques des cuivres apparaissent progressivement, du grave à l'aigu avec une allure le plus souvent exponentielle ; la durée varie largement et dépend aussi bien du type d'instrument que du style d'attaque (trompette, b ; cor, c). L'ordre d'arrivée peut être irrégulier et prendre un temps relativement long, comme ici pour la flûte (d), mais là encore tout dépend du mode d'attaque : un « coup de langue » raccourcit considérablement le transitoire, une articulation *legato* l'allonge. Enfin, les orgues électroniques font parfois apparaître le grave avant l'aigu (e), mais cela dépend du système de diffusion et de la qualité des haut-parleurs.

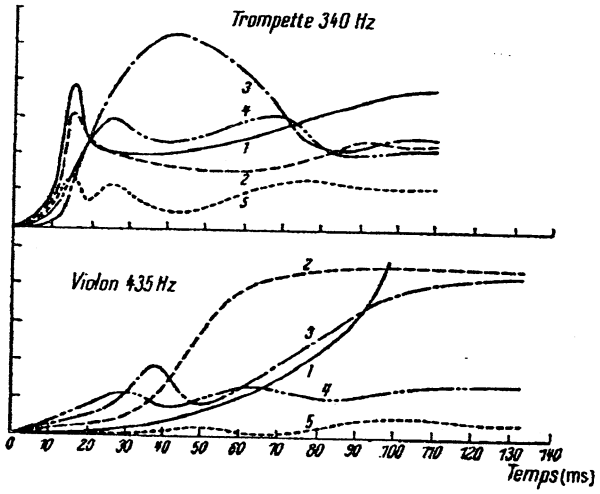


Fig. 70 : transitoires d'attaque : évolution des composants

Les harmoniques ou les partiels présentent non seulement des décalages temporels entre eux, mais au cours de leur apparition, leur amplitude peut varier notablement. La figure 70 montre ainsi les courbes d'établissement des cinq premiers composants pour un fa_3 de trompette et

un la_3 de violon. L'évolution des harmoniques semble totalement aléatoire, et n'obéir à aucune loi connue (cf. par exemple le fondamental ou l'harmonique 3 de la trompette).

2.2. Les transitoires d'extinction

Par rapport à l'attaque, l'extinction d'un son comporte peu de bruit ajouté, c'est-à-dire de partiels étrangers au régime stationnaire. En revanche, sa durée varie dans des proportions considérables, allant de quelques millisecondes à plusieurs secondes selon le type d'instrument ou la technique de jeu (cf. le piano joué *staccato* ou avec la pédale). Il est possible là aussi d'observer des formes caractéristiques d'extinction du son, progressives ou aléatoires, sur des durées plus ou moins longues.

Sans être négligeables, les transitoires d'extinction n'ont pas la même importance que les transitoires d'attaque. Cela tient à leur position à la fin du son, la sensation de timbre est déjà constituée quand ils apparaissent, ce qui réduit évidemment leur influence.

Il est possible, cependant, de considérer les sons percussifs comme une juxtaposition de deux transitoires sans régime stationnaire, l'extinction s'enchaînant directement à l'attaque. Dans une telle conception, la phase finale retrouve toute son importance.

Si les transitoires sont déterminants dans l'élaboration de la sensation de timbre musical, il est un domaine où leur action est plus fondamentale encore : dans le langage parlé, ils constituent l'essentiel de l'information sémantique, et sous la forme des consonnes associées aux voyelles, la diversité de leur structure acoustique est pleinement exploitée.

3. Les composantes spatiales

Un son musical n'est pas un objet abstrait que l'on peut isoler pour l'étudier plus facilement. Il se propage dans un environnement qui le modifie et lui impose des distorsions. Il faut donc examiner les paramètres extérieurs au son, susceptibles d'altérer ou de transformer la perception du timbre, c'est-à-dire le résultat final, celui qui rentre effectivement dans les oreilles pour devenir une sensation.

Nous avons déjà étudié (chap. IV) la propagation du son en présence d'obstacles. Rappelons brièvement les deux principaux modes d'action d'une salle sur le timbre.

D'abord la **réverbération**, qui agit directement sur les transitoires, d'une façon plus ou moins importante selon la valeur du TR. Non seulement la fin d'un son qui se prolonge vient interférer avec le début du suivant, ce qui provoque déjà des modifications appréciables, mais l'attaque aussi subit un allongement temporel de nature à transformer plus subtilement et profondément la sensation de timbre.

La « **couleur** » acoustique de la salle est également un paramètre à ne pas négliger. Tout lieu possède à des degrés divers des résonances propres, liées à des régimes d'ondes stationnaires, qui agissent sur les spectres sonores en déplaçant l'énergie disponible, privilégiant ou pénalisant certains formants par rapport à d'autres. Les salles de concert possèdent ainsi en propre des ambiances sonores auxquelles sont sensibles les grands concertistes. Les timbres y acquièrent une couleur ou un relief particuliers qui ne conviennent pas nécessairement à tous les types de musique[1].

---

[1] Cf. F. Winckel, "Architecture et musique spatiale", *Conférences des Journées d'études du Festival international du Son,* Paris, 1971.

Quelle que soit la salle, l'acoustique n'y est pas strictement identique partout, ce qui pose des problèmes aux musiciens attentifs aux réglages de la sonorité. La difficulté principale vient cependant de la position même de l'instrumentiste : jouant généralement près de ses oreilles, il ne peut avoir qu'une idée approximative et intuitive de la façon dont les auditeurs vont percevoir le timbre de son instrument et de la part prise par la salle dans la sonorité finale.

CHAPITRE XVIII

LE BRUIT

1. Le concept de bruit

1.1. Bruit et environnement

Devenu aujourd'hui l'une des formes de pollution les plus préoccupantes, le bruit est un déchet totalement irrécupérable de l'industrie humaine. Responsable direct de plus de 11% des accidents du travail, il en provoque en réalité beaucoup plus par ses effets secondaires, fatigue, baisse de vigilance, etc. Certains experts chiffrent par millions le nombre d'heures perdues par jour par suite du travail mal fait, sans compter le gaspillage de matériel, la détérioration des conditions de travail, l'énervement, le stress...

Le bruit n'est certes pas un phénomène nouveau, et apparaît inéluctablement lié l'activité humaine. Dès l'Antiquité, il est dénoncé avec vigueur :

> "L'homme pauvre, Sparsus, ne peut ni méditer à Rome, ni s'y reposer. Tant de gens vous empêchent d'y vivre ! Le matin ce sont les maîtres d'école ; la nuit, les boulangers, et tout le long du jour, des chaudronniers et leurs marteaux. Ici, c'est le changeur qui passe son temps faire

> sonner sur son sale comptoir des pièces frappées à l'effigie de Néron ; là, c'est le batteur de lin d'Espagne qui l'écrase sur la pierre à l'aide d'un fléau poli ; ce sont encore les cris incessants des prêtres de Bellone ; la voix criarde du naufragé portant au cou sa tirelire ; celle du Juif instruit par sa mère à mendier et du marchand d'allumettes aux yeux chassieux. Qui compterait les heures perdues à Rome pour le sommeil dirait le nombre de mains qui frappent sur des bassins de cuivre pour ensorceler la lune..."[1]

De tels témoignages sont nombreux au cours de l'Histoire, et leur analyse montre que la gêne provenait surtout de la voix humaine et des sons d'impacts. Mais comme la musique elle-même, notre environnement sonore a évolué et sa structure spectrale s'est modifiée au fil du temps, particulièrement à l'avènement de l'ère industrielle, avec son cortège de grandes inventions : machine à vapeur puis électricité, automobile et avion, qui assurent la présence du moteur à explosion dans les contrées les plus reculées de notre planète, enregistrement et radiodiffusion qui permettent d'occuper l'espace sonore partout, et tout le temps.

Les sons d'impacts sont toujours nombreux, mais peu à peu s'est installé autour de nous un bruit de fond à caractère continu, en forme de spectre aléatoire riche en basses fréquences, omniprésent, véritable emblème de notre société moderne. Même si nous ne l'entendons pas toujours consciemment il est toujours là, ne cessant de stimuler jour et nuit nos capteurs auditifs et solliciter notre système nerveux.

1.2. Définitions physiques

Le bruit peut-il être défini par ses caractéristiques physiques ? Cela a souvent été tenté, récemment encore ; il est alors curieusement décrit en

---

[1] Martial, Ier s. ap. J.-C. Cité par É. Leipp dans *La machine à écouter,* Paris, 1977.

termes de tonie : *"son de hauteur indéterminée"*, ou selon sa nature vibratoire : *"son non harmonique, apériodique, vibration complexe irrégulière"*...

De telles formulations, outre qu'elles englobent les sons de beaucoup d'instruments de musique, notamment les percussions, ne rendent compte que de la forme d'un signal et non de l'effet qu'il produit. Or, en matière de bruit, l'aspect perceptif est essentiel.

1.3. Aspect psychologique du bruit

Un bruit est un *son gênant*. C'est une définition correcte, avec tout ce qu'elle suppose de subjectivité. L'essence bruyante d'un son n'étant pas fonction de sa nature, mais de la façon dont il est reçu, tout signal sonore est susceptible de provoquer une nuisance : il arrive qu'une symphonie de Mozart écoutée le soir dans un appartement soit de la musique sublime d'un côté de la cloison, du bruit insupportable de l'autre.

Dans le même ordre d'idée, un mécanicien qui fait ronfler un moteur gêne certainement ses voisins, mais écoute attentivement un signal qu'il analyse pour effectuer des réglages : vacarme pour les uns, informations utiles pour d'autres ; il est d'ailleurs remarquable, dans cette situation, que le mécanicien appellera sans doute « bruit » un petit événement que le non initié entendra à peine dans le spectre du moteur.

C'est pourquoi le concept de bruit doit être étendu, pour s'appliquer à *toute déformation non souhaitée dans un signal*. Sont donc concernées par cette définition toutes les altérations inévitables dans les systèmes de transmission des messages, comme la distorsion et le bruit de fond générés par chaque maillon de la chaîne.

1.4. Bruit et musique

L'erreur de prétendre réduire le bruit à sa seule forme physique, et d'opposer sa structure à celle du son musical, apparaît clairement avec l'évolution de la musique contemporaine. Luigi Russolo (1885-1947), peintre italien et membre du mouvement futuriste fondé par Filippo Marinetti, fut le premier à intégrer totalement le bruit à l'oeuvre musicale[1]. Pour lui, le bruit est au timbre musical ce que la dissonance est à la consonance sur le plan harmonique, une nécessité facteur d'évolution. Les bruits ne doivent pas être imités, mais combinés et traités comme un matériau musical à part entière. La musique deviendrait ainsi le reflet esthétique de notre époque dominée par le machinisme, lui-même grand producteur de bruits. Russolo utilisait dans ses concerts différents bruiteurs auxquels il donnait des noms évocateurs : hululeur, crépiteur, bourdonneur, éclateur, croasseur, sibileur, froufrouteur, grondeur, strideur, glouglouteur...

Cette tentative de créer une musique figurative où s'exprimerait « la voix des choses », malgré son succès auprès des Surréalistes, des Dadaïstes et du Groupe des Six, tourna court probablement par suite des difficultés techniques rencontrées à chaque concert : précurseur visionnaire, Russolo n'avait peut-être pas non plus l'étoffe d'un compositeur authentique, capable de transformer une idée originale en une oeuvre achevée. Mais son influence fut considérable sur des musiciens comme Edgar Varèse (1883-1965) ou John Cage (1912-1992), et les conceptions de Russolo ont favorisé l'éclosion de la musique électronique créée par Herbert Eimert (1897-1972) à Cologne en 1945, et de la musique concrète imaginée à Paris en 1948 par Pierre Schaeffer (né en 1910).

---

[1] Cf. son *Arte dei rumori*, Milan, 1913.

2. La mesure du bruit

2.1. Les unités de mesure

Un bruit peut-il être mesuré comme n'importe quel autre son ? Certainement pas, et c'est la conséquence de sa nature psycho-physiologique : déterminer des niveaux en décibels sans tenir compte de leur sonie est inutile. C'est donc le phone qui doit servir d'unité de mesure.

Mais les appareils de mesure ne peuvent tenir compte de la totalité des lignes isosoniques : par exemple, un son de 60 dB vaut environ 10 Ph à 50 Hz, 20 Ph à 70 Hz, et 50 Ph à 100 Hz (cf. diagramme de Fletcher p. 166). C'est pourquoi l'étalonnage se limite le plus souvent à trois courbes de réponse, dénommées A, B et C, correspondant respectivement aux courbes isosoniques 40 Ph, 70 Ph, et 100 Ph du diagramme de Fletcher. Les résultats s'expriment en dB(A), dB(B) ou dB(C) selon la courbe utilisée.

2.2. Le sonomètre

Le sonomètre est un appareil portatif muni d'un microphone, d'un amplificateur et d'un système de pondération correspondant aux courbes A, B et C définies ci-dessus. Pour mesurer l'intensité d'un son, on sélectionne sur le sonomètre un circuit de pondération en fonction du niveau approximatif de ce son : A pour les sons faibles ou peu intenses, B pour les intensités moyennes ou C pour les niveaux élevés. L'appareil fournit alors une valeur en dB(A), dB(B) ou dB(C) selon le choix effectué — en réalité une mesure en phone — tenant compte par conséquent de la fréquence du son.

A l'heure actuelle, on utilise presque exclusivement les dB(A) pour toutes les intensités, parce qu'ils correspondent mieux à la perception subjective. Souvent, dans les média non spécialisés, des chiffres relatifs au bruit sont cités et exprimés en décibels, sans autre précision : il s'agit alors généralement de dB(A).

Le sonomètre dispose également de plusieurs constantes de temps (généralement deux) pour effectuer ses mesures : une rapide, de 125 millisecondes, appelée *caractéristique F* (comme *fast*) pour suivre avec précision l'évolution d'un son s'il ne varie pas trop vite ; l'autre plus lente, la caractéristique S (*slow*), de 1000 millisecondes, pour intégrer des variations trop rapides pour être lues en position *F*.

2.3. Le « thermomètre » du bruit

Il est utile de connaître la valeur en dB(A) d'un certain nombre de bruits de référence, afin d'avoir en tête un ordre de grandeur. Les chiffres suivant sont fournis à titre indicatif, et susceptibles de variations.

Fusée Ariane au décollage	200	
Décollage d'un Boeing à 25 m	140	
Marteau pneumatique	130	zone traumatique
Orchestre rock	120	
Avertisseurs de certaines voitures	110	
Scie circulaire à bois	100	zone dangereuse
Cyclomoteur	90	
Compartiment de train ou de métro	80	
Circulation routière moyenne	70	zone de fatigue
Magasins	60	
Conversation animée		
Imprimante matricielle	50	

Rue calme	40	zone de repos diurne
Studio d'enregistrement	30	limite de repos nocturne
Voix chuchotée	20	

La partie droite du tableau indique les normes légales, mais les spécialistes de l'audition s'accordent à les trouver trop tolérantes et au-dessous des dangers réels.

2.4. Limites de la métrologie

Le sonomètre est utile, surtout pour des relevés comparatifs, par exemple avant et après traitement en cas d'insonorisation d'un local. Mais il reste malgré tout d'un emploi difficile, et les résultats fournis ne sont pas toujours en accord avec les sensations subjectives.

L'étalonnage du sonomètre est simpliste, comparé à l'audition humaine, mais multiplier les circuits de pondération rendrait son utilisation trop compliquée. Plus le son est évolutif, moins le sonomètre est efficace, et l'on sait à quel point les bruits peuvent varier rapidement.

D'autre part nous ne savons pas bien encore à l'heure actuelle comment s'effectue, dans le système auditif, la sommation des intensités perçues. La méthode adoptée pour les sonomètres ne donne pas de très bons résultats avec les sons complexes, surtout si leurs formes sont assez différentes les unes des autres. Les chocs, impulsions et sons d'impacts, si fréquents avec le bruit, sont également difficiles à mesurer et exigent des constantes de temps de l'ordre de 20 millisecondes, en tout cas bien inférieures à celles dont les sonomètres disposent habituellement.

Dans des cas réels, l'emplacement où effectuer les mesures n'est pas facile à déterminer. Le bruit varie d'un endroit à l'autre, et le point d'émergence maximale n'est pas forcément représentatif de l'ensemble

de la zone bruyante. En fin de compte, deux opérateurs n'obtiennent pas toujours le même résultat dans la même situation.

3. La forme du bruit

3.1. Structure des bruits de fond

L'acoustique moderne a accompli de grands progrès depuis qu'elle ne considère plus le bruit seulement sous l'angle quantitatif, mais qu'elle prend en compte sa forme, ainsi que le contexte dans lequel il émerge.

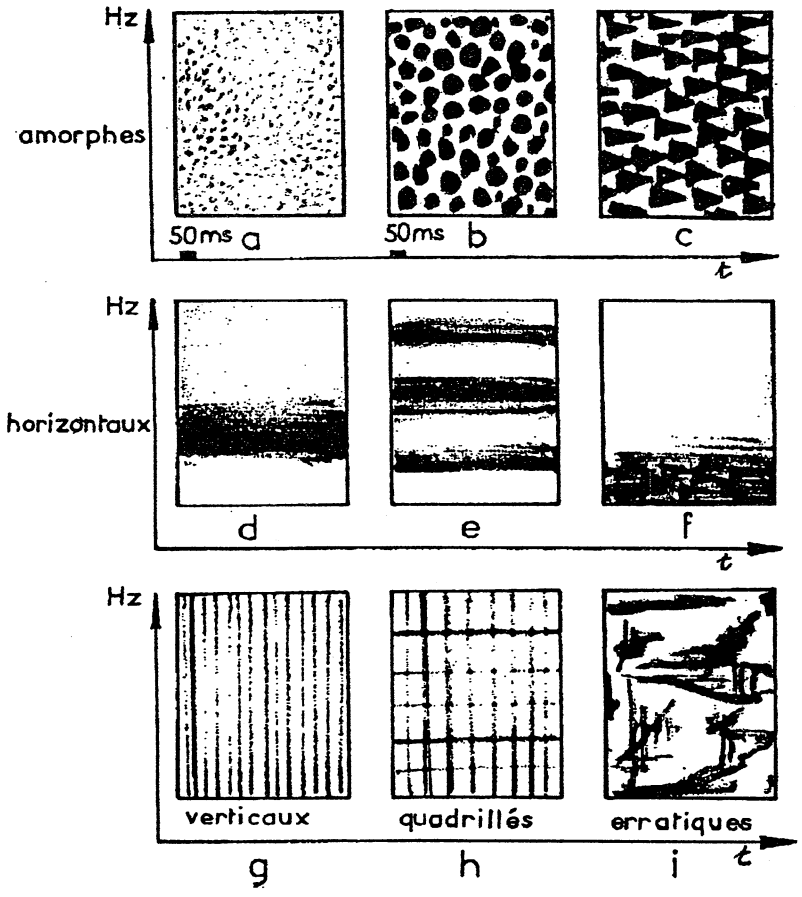


Fig. 71 : différents bruits de fond

La figure 71 présente neuf bruits de fond typiques auxquels peuvent être assimilés, en pratique, la plupart des cas possibles. Les **bruits**

blancs : amorphe (a), du type écoulement d'air comprimé ; granuleux (b) si l'intensité de certains micro-événements est plus importante ; à granulation triangulaire (c) dont la micro-structure est perceptible et orientée dans le temps, par exemple pour les bruits de grande circulation ; les **bruits de fond à organisation horizontale ou verticale** : une ou plusieurs bande formantique (d, e) à caractère continu, comme avec les avions à réaction, ou combinée à des micro-structures (f) ; chocs en rafale sur des matériaux amortis (g) ; **les bruits de fond hétérogènes** : chocs en rafale sur matériaux résonants (h), ou erratique (i), comme le bruit d'une gare en période d'affluence, composé d'un grand nombre d'éléments différents à caractère aléatoire, trafic, paroles, signaux d'avertissement.

Tous ces bruits peuvent très bien présenter exactement la même intensité en phones ou en décibels, et donc être identiques pour le sonomètre, alors qu'ils sont fortement différenciés par l'oreille. Le niveau de gêne qui en résulte n'est pas équivalent pour toutes les formes, ce dont ne peut rendre compte la métrologie classique. Remarquons au passage la parfaite adaptation de la spectrographie à ce type d'analyse.

3.2. Niveau physique et émergence

Le relevé sonométrique ne décrit donc pas suffisamment la perception humaine. La figure 72 en apporte un preuve supplémentaire très convaincante. Elle présente le sonagramme d'un bruit de circulation à Paris, dans lequel on distingue le coup de sifflet d'un agent de police. Sur ce spectre, a été calée une courbe de niveau qui mesure avec précision l'évolution globale de l'intensité. Les résultats sont spectaculaires : l'événement principal de l'enregistrement, celui qu'on *voit* immédiatement et donc qu'on *entend* le plus distinctement, est le coup de sifflet ; or, rien de ce signal ne transparaît sur la courbe de niveau, tout se

passe comme s'il n'existait pas. Cela se comprend aisément : la courbe indique en permanence le niveau des éléments les plus intenses, et dans le cas présent, le bruit de circulation représente une énergie bien supérieure à celle du sifflet.

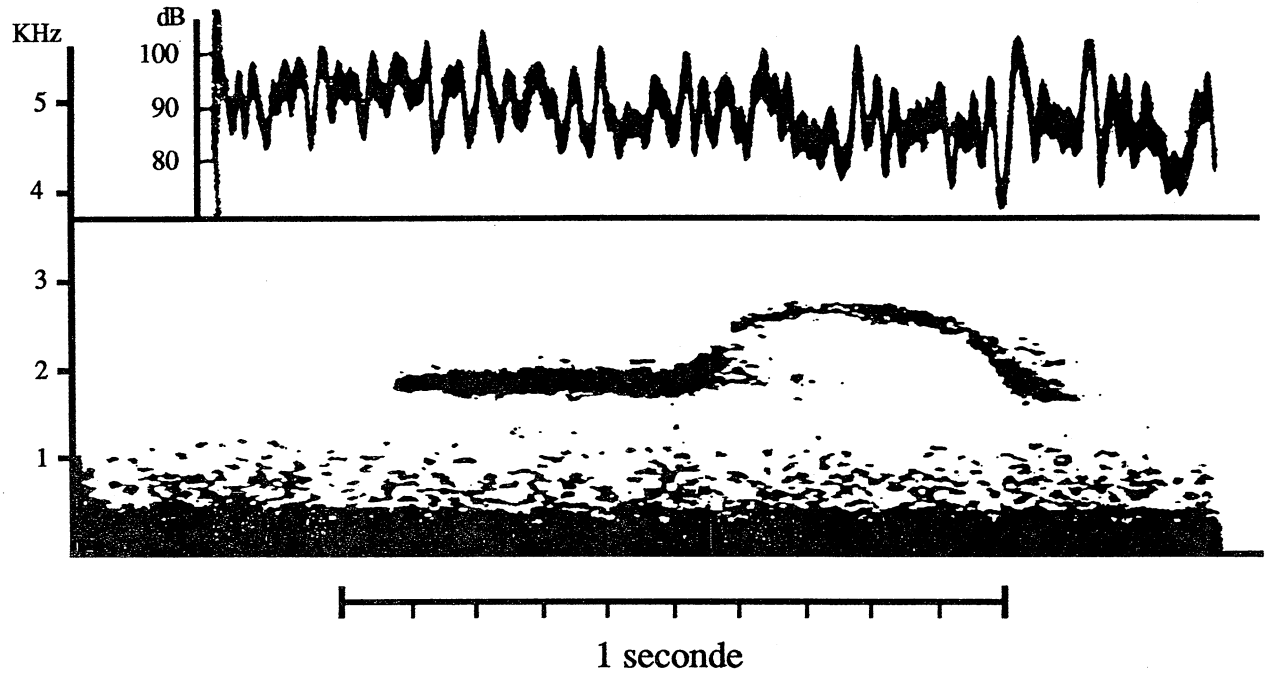


Fig. 72 : émergence d'une forme sur un fond

Ce qui ressort d'une telle expérience, c'est que le système auditif est moins sensible à la puissance sonore totale qu'à la reconnaissance d'une forme originale. Cette constatation permet d'envisager le bruit dans une perspective nouvelle : nous le définirons comme *la perception de l'émergence d'une forme gênante sur un fond par effet de contraste.*

3.2.1. Bruits de faible niveau

Cette conception permet de comprendre la gêne provoquée par les bruits faibles. Une goutte d'eau qui tombe régulièrement d'un robinet, la

nuit, dans un appartement calme, le papier de bonbon qu'un voisin de cinéma froisse avec application, sont des bruits qui peuvent être agaçants, voire insupportables dans le premier cas, et dont le niveau physique est cependant si faible qu'il est immensurable par le sonomètre. Leur forme est en revanche très originale par rapport à leur contexte d'émergence et leur perception en est facilitée d'autant.

Ce problème se pose d'ailleurs souvent dans les lieux calmes ou insonorisés : si le niveau sonore est effectivement réduit, l'originalité formelle des bruits n'est pas altérée pour autant, et une gêne, autrefois mal comprise par l'acoustique traditionnelle, peut subsister en présence de tels sons, d'autant plus qu'un réflexe malencontreux conduit parfois à tendre l'oreille pour mieux les entendre.

3.2.2. Bruit et quantité d'information

L'information peut être définie en première analyse comme *ce qui change dans un signal*. Plus la forme du bruit est originale par rapport à son contexte d'émergence, plus elle véhicule d'information, et plus elle est ressentie comme nuisante. Un avertisseur d'automobile est bien perçu dans le brouhaha de la circulation, mais plus encore s'il émet plusieurs tons successifs (c'est d'ailleurs interdit par le code de la route). Bouasse l'avait déjà remarqué il y a plus d'un demi-siècle :

> "J'écris ces pages, fenêtre ouverte sur un jardin, à 60 mètres d'une avenue qui est route nationale. J'entends corner les autos. J'ai l'agrément supplémentaire des petites cornes utilisées par les receveuses des remorques des tramways... Je suis plus agacé par les petites cornes, non qu'elles soient sensiblement plus aiguës que les cornes d'auto, mais parce que ces dames jouent des airs". [1]

---

[1] H. Bouasse, préface de *Tourbillons, Circulation, Forces acoustiques*, Paris, 1931.

Le bruit considéré comme une forme peut-il être mesuré ? Les récents développements de la théorie de l'information, particulièrement dans le traitement des images, ont montré que c'était parfaitement possible. Mesurer un bruit consiste donc à *extraire la quantité d'information d'une forme*, à évaluer son originalité par rapport à son environnement, et pas seulement à chiffrer ses dimensions physiques.

3.2.3. Signaux d'avertissement

Nous sommes en mesure, à la lumière de ces nouvelles conceptions, de définir ce que doivent être les caractéristiques d'un signal d'avertissement. C'est l'exact contraire du bruit, le signal utile par excellence. Sa forme est plus importante que son intensité, et sera choisie après analyse du fond sonore sur lequel le signal doit émerger. C'est ainsi par exemple qu'une sonnerie métallique serait très mal adaptée à l'ambiance h de la figure 71 : il faudrait plutôt là un son à évolution « oblique », comme une sirène ascendante et descendante. Dans un bruit de fond erratique (i), une forme régulière et surtout répétitive sera parfaitement entendue, même si son intensité est nettement inférieure à celle du fond sonore. La SNCF a effectué durant plusieurs années des analyses précises du bruit ambiant dans les gares pour déterminer la bande de fréquence la plus favorable à la diffusion par haut-parleurs de ses messages parlés. Le résultat en est une nette amélioration de l'intelligibilité des annonces.

4. Effets du bruit sur l'homme

Les effets pernicieux du bruit sont mieux connus depuis quelques années, et les spécialistes ne cessent d'en souligner les dangers et d'attirer l'attention des Pouvoirs publics.

4.1.Troubles de l'écoute

Le bruit provoque des effets de masque, brouillages et anamorphoses susceptibles d'altérer la signification du langage, avec ce que cela suppose d'irritation, d'énervement ou de baisse d'attention. Il peut perturber la localisation des sources sonores, recouvrir des ordres importants ou des signaux d'avertissement, risquant ainsi de provoquer des accidents.

4.2. Traumatismes auditifs

Le bruit est responsable de la fatigue auditive et surtout de la surdité professionnelle ; il accentue en outre la diplacousie (cf. p. 184). Les lésions traumatiques dues à des explosions sont heureusement assez rares. On estime à 185 dB l'intensité requise pour rompre les tympans, ce niveau pouvant être largement dépassé lors d'attentats à la bombe. A titre comparatif, le niveau de crête d'un coup de fusil de chasse dépasse 160 dB à 30 cm.

Les bruits intenses portent également atteinte au sens de l'équilibre, par suite d'une trop forte stimulation vestibulaire[1]. Cela peut aller jusqu'à des vertiges accompagnés de nausée, de vomissements, provoquer des chutes et même des syncopes (comme cela est fréquemment observé lors des concerts de rock).

4.3. Effets physiologiques généraux

Le bruit n'agit pas seulement sur les organes de l'ouïe, mais sur l'ensemble du système nerveux, créant des désordres neurovégétatifs. Les observations systématiques ne sont pas faciles à effectuer, car il n'est évidemment pas question de soumettre un organisme humain à des

---

[1] K.D. Kryter, *The Effect of Noise on Man*, New York, 1970.

expériences susceptibles de le léser. Certains effets ont pu néanmoins être mis en lumière : action nocive sur la digestion, troubles circulatoires et du métabolisme en général, avec bien sûr altération du sommeil entraînant une diminution de la récupération.

Cela se répercute sur le psychisme et agit sur le comportement, induisant une agressivité pouvant conduire jusqu'au geste meurtrier, comme le rappelle à longueur d'années la rubrique des faits divers dans les journaux.

Certaines vibrations très intenses, même inaudibles comme les infrasons, peuvent être nocives pour le corps humain lorsque la fréquence excitatrice est égale à la fréquence propre d'une de ses parties : 10 à 12 Hz pour la colonne vertébrale, 60 Hz pour la cage thoracique, 30 à 80 Hz pour les globes oculaires.

L'effet des ultrasons (> 20 000 Hz) sur l'organisme est encore mal connu, car ces ondes s'accompagnent presque toujours d'interférences de fréquences inférieures audibles, et il n'est pas aisé de distinguer l'action propre des unes et des autres. En conclusion, même si les effets du bruit dépendent du sujet, de son état général physique et psychique, les conséquences en sont toujours néfastes et pas forcément décelables dans l'immédiat.

4.4. Protections individuelles contre le bruit

Elles sont de plus en plus utilisées, sans doute à cause du prix élevé de l'insonorisation des habitations. Il existe trois sortes de protections sur le marché à l'heure actuelle :

a) les boules de cire

b) les bouchons d'oreille

c) les casques serre-tête

Leur efficacité est facile à mesurer, par égalisation de la sonie de deux sons de même fréquence entendus avec et sans protection.

a) Les boules de cire se pétrissent avec les doigts et s'ajustent dans le conduit auditif ; l'atténuation moyenne en est de 25 dB, meilleure dans les aigus (jusqu'à 35 dB) ; mais ces boules ne sont pas faciles à placer, et ne tiennent alors pas bien.

b) Les bouchons d'oreille se présentent sous la forme de petits cylindres ou de cônes, en matière plastique ou en caoutchouc, à introduire dans le conduit auditif : l'atténuation va de 0 dB (pour certaines marques) à plus de 35 dB[1] ; ils sont généralement conçus pour laisser passer les bandes de fréquence du langage. Mais leur port prolongé cause souvent des irritations, voire des infections dans le conduit auditif.

c) Les casques serre-tête ressemblent aux casques d'écoute dits « fermés » dont les coussins contiennent des matériaux isolants ; leur atténuation est comparable à celle des dispositifs précédents, et sont aussi peu efficaces contre le bruit de fond. Ils sont obligatoires à certains postes de travail dans les ateliers très bruyants. Malheureusement, s'ils tiennent bien, ils compriment les tempes, gênent la circulation sanguine et provoquent des maux de tête[2].

Les dispositifs individuels de protection présentent donc de nombreux inconvénients, et il est déconseillé de les utiliser comme un moyen permanent de défense contre le bruit.

* *
*

La législation est aujourd'hui importante en matière de bruit et débouche sur une réglementation de plus en plus précise (cf. p. 180). Elle reste cependant en retrait par rapport aux recommandations des experts

---

1 A. Darabont, *La lutte contre le bruit*, Paris, 1979.
2 M.-C. Botte et R. Chocholle, *Le bruit*, Paris, ^{4}1984.

acousticiens et médicaux, qui estiment dans l'ensemble que les normes devraient être redéfinies selon un barème de ce type :

entre 30 et 65 Ph : réactions physiologiques perceptibles
entre 65 et 80 Ph : perturbations psychiques et physiologiques
entre 80 et 95 Ph : traumatismes possibles
à partir de 95 Ph : traumatismes certains

La limite acceptable du bruit est donc de 80 Ph et même de 80 dB, car pour de tels niveaux l'important est l'énergie acoustique effectivement enregistrée par l'oreille ; la limite à ne jamais dépasser est inférieure à 100 dB, là où le risque se transforme en certitude.

Les seuils de tolérance au bruit sont de toute façon très difficiles à évaluer car l'aspect quantitatif ne résume pas à lui seul tout le contenu de la nuisance, les sons faibles pouvant, nous l'avons vu, être cause de désordres psychologiques.

CONCLUSION

La démarche adoptée dans ce cours peut finalement se résumer en deux points ; décrire les phénomènes physiques produisant une sensation sonore ; étudier cette sensation pour elle-même, selon ses lois propres, qui s'écartent de celles de l'acoustique théorique.

Cette distinction, fondement de la psychoacoustique, est indispensable à effectuer de par la nature de nos facultés perceptives. Confronté aux paramètres physiques du son — fréquence, intensité et durée —, notre système auditif adopte un comportement spécifique conditionnant notre attitude face à la musique, et dont les principes essentiels peuvent être maintenant résumés en manière de conclusion.

1. Le système auditif ne sait pas mesurer les dimensions d'un signal acoustique : il ne compte pas les périodes des oscillations, n'entend pas la hauteur en hertz ni ne mesure l'intensité en décibels et le temps en secondes.

2. Le système auditif ne sait pas analyser un son en termes de formants, de nombre et répartition des composants, etc. En bref, il n'entend pas un spectre de 294 Hz à 23 harmoniques d'amplitude 1/n, valant 75 dB et durant 850 ms, mais un ré de violon *forte* durant un court

instant. Tous ces paramètres physiques sont bien perçus, mais globalement, synthétiquement, pour constituer une **image acoustique.**

3. S'il n'effectue pas de mesure, le système auditif évalue en revanche les rapports quantitatifs avec précision. Son seuil de perception différentielle est d'environ 2 dB pour les intensités moyennes, et de 4 cents ou 1 σ (au mieux) pour les intervalles mélodiques ; la précision devient immense avec les intervalles harmoniques (inférieure au cent), grâce à l'audition des battements, en tout cas bien supérieure à celle des instruments de mesure. Pour les durées, nous sommes surtout sensibles aux fluctuations rythmiques.

4. D'une façon générale, le système auditif perçoit bien ce qui change dans un son, c'est-à-dire la quantité d'information débitée. Mais cette notion est complexe, car le taux d'information dépend directement de sa prévisibilité : si les changements opérés dans le signal sont toujours les mêmes, donc totalement prévisibles, ils ne seront plus perçus comme informations au bout d'un certain temps ; si au contraire ils prennent un caractère aléatoire et totalement imprévisible, le taux d'information débité est certes maximum, mais l'information perçue est cette fois encore quasi nulle, car le récepteur n'est plus adapté au décodage du message. C'est le cas d'un individu, par exemple, qui dirait des choses très intéressantes dans une langue que son interlocuteur ne comprend pas.

Il en va de même en musique où les algorithmes de la « compréhension » du message sont les règles de composition, au sens large du terme, quel que soit le type de langage.

5. Le système auditif ne fait pas d'intégration ou de moyenne au sens mathématique du terme, il n'arrondit pas, ne « lisse » pas les courbes mais au contraire conserve aux phénomènes toute leur complexité ; ses réponses dépendent de tellement de facteurs d'ordre psychosomatique

qu'il n'est jamais certain de réagir de la même façon aux mêmes stimulus.

6. Le système auditif est incapable de faire des équivalences, parce qu'il considère le son comme une forme. De même que l'oeil ne reconnaît pas comme identiques un carré et un triangle de surfaces pourtant égales, la main deux objets différents mais de même poids, l'oreille n'éprouve pas de sensations comparables entre deux spectres de fréquences et de niveaux identiques si leur forme acoustique est différente. C'est pourquoi expérimenter avec des sinusoïdes ne donne que peu de renseignements sur les sons réels.

7. Il n'existe pas de paupières pour les oreilles, c'est un fait, mais le cerveau dispose néanmoins du pouvoir de « déconnecter » les capteurs auditifs, de façon à ce que nous n'entendions effectivement plus les sons extérieurs. Cette fonction est mise en place pendant le sommeil, où les oreilles continuent de fonctionner normalement, mais également à l'état de veille, en cas de forte concentration ou d'attention focalisée ailleurs.

Surtout, le système auditif sait filtrer l'information. Il le fait d'ailleurs en permanence, car l'environnement sonore est trop riche pour être traité intégralement. C'est l'écoute sélective, qui permet d'isoler une voix dans un brouhaha de conversations, de suivre une ligne dans la polyphonie, d'identifier un timbre dans un ensemble instrumental.

* *
*

Le système auditif est donc un dispositif à capter et à traiter des formes, véritables images mentales formées dans le cortex auditif. Il effectue des comparaisons entre les nouvelles venues et le contenu de sa mémoire, les trie, les classe, établit entre elles des taux de corrélation ; il opère des associations non seulement au niveau auditif, mais intégrant

d'autres stimulations sensorielles, et dont le résultat final dépend d'innombrables facteurs parmi lesquels la culture et l'éducation, la mémoire, le potentiel intellectuel, la sensibilité et l'affectivité. Il peut aussi se tromper, confondre, oublier, et rendre ainsi unique l'expérience musicale individuelle de l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

Les titres cités dans le cours du texte et dont l'intérêt est purement historique ne sont pas repris ici. Les étudiants intéressés par cet aspect de l'acoustique musicale peuvent consulter les ouvrages de HUNT et de LINDSAY (cf. infra).

ASSELIN (P.-Y.), *Musique et tempérament : théorie et pratique de l'accord à l'ancienne*, Paris, 1984.

BACKUS (J.), *The Acoustical Foundations of Music*, New York, ^{2}1977.

BEKESY (G. v.), *Experiments in Hearing*, New York, 1960.

BENADE (A. H.), *Fundamentals of Musical Acoustics*, Londres, 1977.

BONFILS (P.), RÉMOND (M.-C.) et PUJOL (R.), "Efferent tracts and cochlear frequency selectivity", *Hearing Research*, 24 (1986).

BOTTE (M.-C.) et CHOCHOLLE (R.), *Le bruit*, Paris, ^{4}1984.

CANAC (F.), *L'acoustique des théâtres antiques. Ses enseignements*, Paris, 1967.

CANAC (F.) éd., *Acoustique musicale*, Colloque du CNRS, Paris, 1959.

CHAILLEY (J.), *Formation et transformation du langage musical*, I, *Intervalles et échelles*, Paris, 1964.

CHANGEUX (J.-P.), *L'homme neuronal*, Paris, 1983.

CHARDIN (D.), *Les surdités*, Paris, 1982.

CONDAMINES (R.), *Stéréophonie. Cours de relief sonore*, Paris, 1978.

CORDIER (S.), *Piano bien tempéré et justesse orchestrale : le tempérament égal à quintes justes*, Paris, 1982.

CRITCHLEY (M.) et HENSON (R. A.), *Music and the Brain*, Springfield, 1977.

DARABONT (A), *La lutte contre le bruit*, Paris, 1979.

DIDIER (A.), *Physique appliquée à la reproduction du son et des images*, t. 1 : *Acoustique, électroacoustique*, Paris, 1964.

ÉMERY (É.), *La gamme et le langage musical*, Paris, 1961.

FELDTKELLER (R.) et ZWICKER (E.), *L'oreille, récepteur d'information*, trad. fr. Paris, 1982.

FLETCHER (H.), *Speech and Hearing in Communication*, New York, 1953.

FRANCÈS (R.), *La perception de la musique*, Paris, ^{2}1972.

GRIBENSKI (A.), *L'audition*, Paris, ^{4}1975.

HARRIS (C. M.), *Handbook of Noise Control*, New York, ^{2}1979.

HUNT (F. V.), *Origins in Acoustics : The Science of Sound from Antiquity to the Age of Newton*, New Haven, 1970.

KELLETAT (H.), *Zur musikalischen Temperatur, insbesondere bei J.-S. Bach*, Kassel, 1960.

KNUDSEN (V. O.) *Acoustique et architecture, Sons et musique*, trad. fr. Paris, 1980.

KNUDSEN (V. O.) et HARRIS (C. M.), Le projet en acoustique architecturale, trad. fr. Paris, 1957.

KOCK (W. E.), *Ondes sonores et ondes lumineuses*, trad. fr. Paris, 1971.

KRYTER (K. D.), *The Effects of Noise on Man*, New York, 1970.

LAMORAL (R.), *Acoustique et architecture*, Paris, 1975.

LEGROS (H.), "Le problème du tempérament", *Bulletin du GAM,* 61 (1972).

LEHMANN (R.), *L'acoustique des bâtiments*, Paris, ^{2}1968.

LEHMANN (R.), *Éléments de Physio et de Psychoacoustique*, Paris, 1969.

LEIPP (É.), *Acoustique et musique*, Paris, ^{4}1984.

LEIPP (É.), "Métrologie et audition", *Bulletin du Groupement des Acousticiens de Langue Française* (1974).

LEIPP (É.), "Le problème de la perception des signaux acoustiques par effet de contraste", *Annales des Télécommunications*, XX/5-6 (1965).

LEIPP (É.), "Tour d'horizon sur le diapason", *Bulletin du GAM* , 37 (1970).

LIÉNARD (P.), *Décibels et indices de bruits*, Masson, 1978.

LINDSAY (R. B.), *Acoustics : Historical and Philosophical Development*, Stroudsburg, 1972.

LÉOTHAUD (G.), "Acoustique musicale et psychophysiologie de la perception", *Précis de musicologie*, rééd., Paris, 1984.

LÉOTHAUD (G.), "Vers une psychophysiologie de la réaction auditive : modélisation de la perception", *L'École maternelle française*, 6 (1975).

MATRAS (J.-J.), *Le son*, Paris, ^{5}1972.

MERCIER (D.) éd., *Le livre des techniques du son*, t. 1, Paris, 1987.

MERCIER (J.), *Traité d'acoustique*, 3 vol., Paris, 1962.

MÉRY (J.), "Presbyacousie et socioacousie", *Revue d'acoustique*, 37 (1976).

MOLES (A.), *Physique et technique du bruit*, Paris, 1952.

MOLES (A.), *Théorie de l'information et perception esthétique*, Paris, ^{2}1972.

PIERCE (J.), *Le son musical*, trad. fr. Paris, 1984.

RISSET (J.-C.), "Hauteur et timbre des sons", *Conférences des Journées d'études du Fest. intern. du Son*, Paris, 1976.

RISSET (J.-C.), "Paradoxes de hauteur", Rapports IRCAM (1978).

ROCARD (Y.), *Dynamique générale des vibrations*, Paris, 1971.

RUSSOLO (L.), *Arte dei rumori*, Milan, 1913.

SABINE (W.), *Collected Papers on Acoustics*, New York, ^{2}1964.

SAUNDERS (F.), "Physique et musique", *Sons et musique*, trad. fr. Paris, 1980.

SCHAFER (R. Murray), *Le paysage sonore*, trad. fr. Paris, 1979.

SCHROEDER (M. R.), "Computer Models for Concert Hall Acoustics", *American Journal of Physics*, 41/4 (1973).

SEASHORE (C.E.), "Forms of artistic pitch deviations in singing", *Psychological Bulletin*, 677 (1934).

SEASHORE (C.E.), *The Psychology of Music*, réed. New York, 1967.

STAUDER (W.), *Einführung in die Akustik*, Wilhelmshaven, 1976.

STEVENS (S. S.), *Le son et l'audition*, trad. fr. New York, 1966.

STEVENS (S.S.) et WARSHOFSKY (F.), *L'acoustique*, trad. fr. Paris, 1970.

STEVENS (S.S.) et DAVIS (H.), *Hearing, its Psychology and Physiology*, New York, ^{3}1948.

TAYLOR (R.), *Le bruit et ses méfaits*, trad. fr. Paris, 1973.

TOBIAS (J. V.) éd., *Foundations of Modern Auditory Theory*, 2 vol., New York, 1970.

VAN ESBROEK (G.) et MONTFORT (G.), *Qu'est-ce que jouer juste ?* Bruxelles, 1946.

WEINREICH (D.), "Comment vibrent les cordes d'un piano ?", *Sons et musique*, trad. fr. Paris, 1980.

WINCKEL (F.), "Architecture et musique spatiale", *Conférences des Journées d'études de Fest. intern. du Son*, Paris, 1971.

WINCKEL (F.), *Music, Sound and Sensation : a modern Exposition*, New York, 1967.

WINCKEL (F.), *Vues nouvelles sur le monde des sons*, trad. fr. Paris, 1960.

WEVER (E. G.), *Theory of Hearing*, New York, 1953.

WOOD (A.), *The Physics of Music*, New York, ^{7}1975.

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 : le mouvement sinusoïdal 9
Fig. 2 : la sinusoïde 9
Fig. 3 : mouvements périodiques complexes 10
Fig. 4 : mouvement non périodique 12
Fig. 5 : l'angle de phase 14
Fig. 6 : somme de trois sinusoïdes 16
Fig. 7 : somme de deux sinusoïdes 16
Fig. 8 : opposition de phase 17
Fig. 9 : courbe en dents de scie 18
Fig. 10 : signal carré 18
Fig. 11 : battements 19
Fig. 12 : enveloppe des battements 20
Fig. 13 : la série harmonique 23
Fig. 14 : l'oscillateur harmonique 35
Fig. 15 : élongation et vitesse 36
Fig. 16: l'amortissement 39
Fig. 17 : décomposition d'un mouvement amorti 40
Fig. 18 : oscillation de relaxation 40
Fig. 19 : signal carré 42
Fig. 20 : onde dans un ressort (1) 46
Fig. 21 : onde dans un ressort (2) 46
Fig. 22 : décalages de phase 48
Fig. 23 : onde dans un tuyau 49
Fig. 24 : la longueur d'onde 54
Fig. 25 : ondes circulaires 58
Fig. 26 : réflexion des ondes 61
Fig. 27 : réflexions multiples 62
Fig. 28 : principe de la réverbération 63
Fig. 29 : le temps de réverbération 63
Fig. 30 : écho tonal 68
Fig. 31 : la focalisation 69
Fig. 32 : la diffraction 73
Fig. 33: diffraction sur un mur 74
Fig. 34 : la diffusion 75
Fig. 35 : réfraction dans l'air 78

Fig. 36 : vibration d'une corde en fuseau 84
Fig. 37 : décomposition d'une vibration transversale 84
Fig. 38 : modes vibratoires d'une corde 85
Fig. 39 : modes vibratoires d'un tuyau ouvert 90
Fig. 40 : modes vibratoires d'un tuyau fermé à un bout 91
Fig. 41 : décalages de phase 102
Fig. 42 : typologie sonagraphique élémentaire 104
Fig. 43 : spectres de raies 104
Fig. 44 : spectres de bruit 106
Fig. 45 : formuke mélodique 108
Fig. 46 : phrase parlée 109
Fig. 47 : analyse sonagraphique complète 113
Fig. 48 : le système auditif 117
Fig. 49 : l'oreille moyenne 118
Fig. 50 : l'oreille interne 120
Fig. 51 : le limaçon 122
Fig. 52 : la cochlée 123
Fig. 53 : l'organe de Corti 124
Fig. 54 : modélisation de la cochlée 135
Fig. 55 : la tonotopie cochléaire 136
Fig. 56 : théorie de la volée 139
Fig. 57 : progression logarithmique 152
Fig. 58 : le champ auditif humain 164
Fig. 59 : le diagramme de Fletcher 166
Fig. 60 : l'audiogramme tonal 174
Fig. 61 : surdité de perception 181
Fig. 62 : audiogramme en valeurs de seuils 181
Fig. 63 : la presbyacousie 183
Fig. 64 : la sensation de hauteur 196
Fig. 65 : le diagramme de Stevens 201
Fig. 66 : le tempérament zarlinien 224
Fig. 67 : timbre et composition spectrale 257
Fig. 68 : transitoires d'attaque : proportion de bruit 262
Fig. 69 : transitoires d'attaque : durée 263
Fig. 70 : transitoires d'attaque : évolution des composants 264
Fig. 71 : différents bruits de fond 276
Fig. 72 : émergence d'une forme sur un fond 278

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 1

Ière partie **LE SON MUSICAL**

Chapitre I : Nature et structure du son musical

1. Notion de mouvement 7
   1.1. Le mouvement périodique 7
      1.1.1. Définitions 7
      1.1.2. Le mouvement périodique simple 8
      1.1.3. Le mouvement périodique complexe ; la loi de Fourier 10
   1.2. Le mouvement non périodique complexe 12

2. Représentation graphique du mouvement complexe 13
   2.1. La phase 13
   2.2. Somme algébrique de mouvements simples 15
   2.3. Différents cas d'addition 16
      2.3.1. Sons types 17
      2.3.2. Battements 19

3. La série harmonique 22
   3.1. Rapports harmoniques et intervalles musicaux 22
   3.2. Propriétés de la série harmonique 23
   3.3. Application à la composition spectacle 26

Chapitre II : Les systèmes oscillants

1. Les unités fondamentales 29
   1.1. Vitesse et accélération 29
   1.2. Masse 30
   1.3. Force 30
   1.4. Pression 31
   1.5. Travail et énergie 32
   1.6. Puissance 33

2. Notion d'oscillation 33
   2.1. Définition 33
   2.2. L'oscillateur harmonique 34
   2.3. Différents types d'oscillations 37
      2.3.1. Oscillations entretenues 38
      2.3.2. Oscillations amorties 38
      2.3.3. Oscillations de relaxation 40
      2.3.4. Oscillations carrées 42

Chapitre III : La génération des ondes

1. La notion d'onde 45
1.1. Onde dans un ressort 45
1.2. Une pierre dans l'eau 47
1.3. Cas du tuyau 48

2. Célérité du son 50

3. La longueur d'onde 54
3.1. Mesure de la longueur d'onde 54
3.2. L'effet Doppler 55

4. Forme des ondes 56
4.1. Ondes longitudinales 56
4.2. Ondes transversales 57
4.3. Ondes circulaires 57
4.4. Ondes sphériques 58

Chapitre IV : La propagation des ondes

1. L'énergie des ondes sonores 59

2. La réflexion 60
2.1. Réverbération 61
2.1.1. Définition 61
2.1.2. Le temps de réverbération 63
2.2. Écho 66
2.2.1. Écho simple 66
2.2.2. Échos multiples 67
2.3. Focalisation 69

3. L'absorption 70
3.1. Le coefficient d'absorption 70
3.2. Le pouvoir d'absorption 72

4. La diffraction 73
4.1. Surfaces réfléchissantes 73
4.2. Ouvertures 74

5. La diffusion 75

6. La réfraction 76

7. Conclusion : problématique de l'acoustique architecturale 78

Chapitre V : Les corps vibrants

1. Les cordes 83
1.1. Forme de la vibration 83
1.2. Fréquence d'une corde 86
1.3. Modes vibratoires 87

2. Les tuyaux 88
2.1. Tuyaux fermés aux deux extrémités 88
2.2. Tuyaux ouverts aux deux extrémités 89
2.3. Tuyaux fermés à une extrémité 90

3. La résonance 92
3.1. La fréquence propre 92
3.1.1. Vibrations libres 92
3.1.2. Vibrations forcées ; la résonance 93
3.2. La loi de Küpfmüller 94
3.2.1. La sélectivité 95
3.2.2. L'amortissement 95
3.2.3. Applications 96
3.3. Formants et zones formantiques 96
3.3.1. Genèse 96
3.3.2. Résonateurs de Helmholtz 98

Chapitre VI : Introduction à la spectrographie

1. Le sonagraphe 101
1.1. Insuffisance de l'oscillographie 101
1.2. Le plan spectral 102
2. Le sonagramme 103
2.1. Typologie élémentaire 103
2.2. Signaux complexes 105
2.3. Interprétation du sonagramme 107
3. Le plan dynamique 112
3.1. La courbe de niveau 112
3.2. La spectrographie en sections instantanées 112
4. L'analyse complète 113

IIème partie **LE SYSTÈME AUDITIF**

Chapitre VII : Anatomie du système auditif

1. Introduction 115
1.1. Données historiques 115
1.2. Présentation 116

2. L'oreille externe 117
2.1. Le pavillon 117
2.2. Le conduit auditif 118

3. L'oreille moyenne 118
3.1. Le tympan 119
3.2. Les osselets 119
3.3. Les muscles et les ligaments 119
3.4. La trompe d'Eustache 120

4. L'oreille interne 120
4.1. Le vestibule 121
4.1.1. Les canaux semi-circulaires 121
4.1.2. L'utricule et le saccule 121
4.1.3. L'innervation 121
4.2. Le limaçon 122
4.2.1. La cochlée 122
4.2.2. L'organe de Corti 123
4.2.3. L'innervation 124

Chapitre VIII : Physiologie du système auditif

1. L'oreille externe 127
1.1. Dispositifs de sécurité 127
1.2. Fonctionnement 128

2. L'oreille moyenne 128
2.1. Mécanismes de protection et de régulation 128
2.2. Fonctionnement 129
2.3. Aspects phylogénétiques 130

3. L'oreille interne 131
3.1. Fonction des capteurs vestibulaires 131
3.2. La déformation de cochlée 132
3.3. La loi du « tout ou rien » 132

4. Théorie de l'audition 133
4.1. Survol historique 133
4.2. La mécanique cochléaire 135
4.3. Codage de la hauteur 137
4.4. Codage de l'intensité 138

Chapitre IX : L'orientation auditive

1. Survol historique 141
2. L'audition binaurale 142
2.1. La localisation circulaire 143
2.1.1. Rôle de la phase 143
2.1.2. Rôle de l'intensité 144
2.1.3. Rôle du décalage temporel : l'effet Haas 144
2.2. La localisation verticale 146
2.3. L'évaluation de la distance 146
3. L'écoute sélective 147
4. Conclusion 147

IIIème partie ÉLÉMENTS DE PSYCHOACOUSTIQUE

Chapitre X : Introduction à la psychoacoustique

1. Introduction 149
1.1. Principes de la psychoacoustique 149
1.2. Domaine de la psychoacoustique 150

2. Les logarithmes 151
2.1. Définition 151
2.2. L'expression logarithmique 154
2.3. Propriétés opératoires 154
2.4. Le Bel et le décibel 155
2.5. Niveau de référence : la valeur 0 dB 156
2.6. Applications numériques 157
2.7. L'addition des niveaux en décibels 159

Chapitre XI : La sensation de niveau

1. Mesure de la sensation de niveau 161
1.1. Loi des seuils de Weber 161
1.2. Loi de Fechner 162
1.3. Application 162

2. Le champ auditif humain 163
2.1. Le diagramme de Wegel 163
2.1.1. Limites et courbes des seuils 164
2.1.2. La zone sensible de l'oreille 165
2.2. Le diagramme de Fletcher 165
2.2.1. Les courbes isosoniques 165
2.2.2. Mesure de la sonie : le phone 166
2.2.3. La non-linéarité de l'audition 167
2.2.4. Dynamique et nuances musicales 168

3. Facteurs modifiant la perception de l'intensité 169
3.1. La prévisibilité des événements sonores 170
3.2. Altérations de l'audition 171

Chapitre XII : La surdité

1. L'audiogramme tonal 173
1.1. Présentation 173
1.2. Le niveau de référence 174

2. Les différents types de surdité 175
2.1. Les surdités temporaires 175
2.1.1. La fatigue auditive 175
2.1.2. Mesure de la fatigue auditive 175
2.1.3. Les surdités accidentelles 176

2.2. La surdité de transmission 176
2.2.1. Les causes 177
2.2.2. L'otospongiose 177
2.2.3. Conséquences sur l'audition 177
2.2.4. Traitement de l'otospongiose 178
2.3. La surdité de perception 179
2.3.1. Les causes 179
2.3.2. Aspects audiométriques 180
2.3.3. Conséquences sur l'audition 181
2.4. La presbyacousie 182
2.5. Les surdités centrales 183

3. L'audiométrie 184
3.1. Dépistage chez les enfants 185
3.1.1. Travaux de Gellé 185
3.1.2. Indices à surveiller 186
3.1.3. Audiométrie statistique 186
3.2. Tests complémentaires 187
3.2.1. Le Rinné 187
3.2.2. Le Weber 188
3.2.3. L'audiométrie vocale 188
3.2.4. Test de Lee 189

4. Conclusion 189

Chapitre XIII : La sensation de hauteur

1. Introduction 191

2. La mesure de la hauteur 192
2.1. Hauteur et logarithmes 192
2.2. Les unités de mesure 192
2.3. Application numérique 194

3. Hauteur et tonie 195
3.1. Élaboration de la sensation de hauteur 195
3.1.1. Hauteur tonale 195
3.1.2. Hauteur spectrale 196
3.1.3. Hauteur formantique 197

4. Interférence des paramètres 199
4.1. Hauteur et registre 199
4.1.1. Distorsion de la sensation d'intervalle 199
4.1.2. L'échelle des mels 200
4.2. Hauteur et intensité : le diagramme de Stevens 200
4.3. Hauteur et durée 202
4.4. Le vibrato 203
4.4.1. Données psycho-physiologiques 203
4.4.2. Aspects musicaux 204
4.5. Hauteur et timbre 204

Chapitre XIV : La sensation d'intervalle

1. Intervalles mélodiques 207
1.1. Seuil de perception différentiel des intervalles 207
1.2. Altération de la perception des intervalles 207
1.2.1. L'attraction 208
1.2.2. La tolérance 208
1.2.3. L'équivoque 209

2. Intervalles harmoniques 210
2.1. Consonance et dissonance 210
2.1.1. Théorie de Helmholtz 210
2.1.2. Données actuelles 211
2.2. Les sons subjectifs 212
2.2.1. Sons soustractifs 213
2.2.2. Sons additionnels 214

3. Justesse et accordage 214
3.1. Qu'est-ce que jouer juste ? 214
3.2. Problèmes d'accordage 216
3.2.1. Instruments à cordes 216
3.2.2. Le cas du piano 216
3.2.3. Instruments à vent 217

Chapitre XV : Le tempérament des échelles musicales

1. Introduction 219

2. Le tempérament pythagoricien 219
2.1. Construction 219
2.1.1. Le cycle des quintes 220
2.1.2. Le comma pythagoricien 220
2.2. Calcul des intervalles 221
2.3.Valeur musicale 222
2.3.1. Caractère mélodique 222
2.3.2. Le problème de la tierce harmonique 223

3. Les tempéraments inégaux 224
3.1. Le tempérament zarlinien 224
3.1.1. Construction 224
3.1.2. Valeur musicale 226
3.2. Les tempéraments à l'époque baroque 227
3.2.1. Principes de base 227
3.2.2. Exemples de tempéraments inégaux 227
3.2.3.Valeur musicale 229

4. Le tempérament égal 229
4.1. Perspective historique 230
4.2. Le tempérament égal à 12 demi-tons égaux 231
4.2.1. Valeur musicale 232
4.2.2. Le Wohltemperierte Klavier de J.-S. Bach 233
4.3. Le tempérament de Holder 236

5. L'ethos des tonalités 237
5.1. Différentes appréciations 237
5.2. Ethos des tonalités et tempérament égal 238

Chapitre XVI : Le diapason

1. La mesure du diapason 243

2. Éléments d'histoire du diapason 244
2.1. Période ancienne 244
2.2. Période moderne 247

3. La codification du diapason 249
3.1. La commission Lissajous 249
3.2. La Conférence internationale de Vienne 251
3.3. Le diapason actuel 252

Chapitre XVII : La sensation de timbre

1. La composition spectrale 256
1.1. Spectres harmoniques 256
1.2. Spectres à partiels 258
1.3. Spectres aléatoires 259

2. Les transitoires 260
2.1. Les transitoires d'attaque 262
2.2. Les transitoires d'extinction 265

3. Les composantes spatiales 266

Chapitre XVIII : Le bruit

1. Le concept de bruit 269
1.1. Bruit et environnement 269
1.2. Définitions physiques 270
1.3. Aspect psychologique du bruit 271
1.4. Bruit et musique 272

2. La mesure du bruit 273
2.1. Les unités de mesure 273
2.2. Le sonomètre 273
2.3. Le « thermomètre » du bruit 274
2.4. Limites de la métrologie 275

3. La forme du bruit 276
3.1. Structure des bruits de fond 276
3.2. Niveau physique et émergence 277
3.2.1. Bruits de faible niveau 278
3.2.2. Bruit et quantité d'information 279
3.2.3. Signaux d'avertissement 280

4. Effets du bruit sur l'homme 280
4.1. Troubles de l'écoute 281
4.2. Traumatismes auditifs 281
4.3. Effets physiologiques généraux 281
4.4. Protections individuelles contre le bruit 282

CONCLUSION 285

BIBLIOGRAPHIE 289

TABLE DES FIGURES 293

TABLE DES MATIÈRES 295

Ces cours sont strictement réservés à l'usage privé de leurs destinataires et ne sont pas destinés à une utilisation collective. Les personnes qui s'en serviraient à d'autres usages, qui en feraient une reproduction intégrale ou partielle, une traduction, sans le consentement du Centre National d'Enseignement à distance s'exposeraient aux poursuites judiciaires et aux sanctions pénales prévues par la loi n° 57 298 du 11 mars 1957.

Directeur de la publication : J.P DUDEZERT imprimé au centre de VANVES